

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

**DISSENY D'UN DRON DESTINAT A TASQUES DE
FOTOGRAMETRIA I ÀUDIO**



Memòria Tècnica, Memòria econòmica i Annexos

Autor:	Xavier Cerqueda Puig
Director:	Manuel Manzanares Brotons
Co-Director:	Juan Manuel Miras López
Convocatòria:	Maig 2018

Resum

Aquest treball consta de dues parts clarament definides en el projecte. La primera està encarada a descriure tot el procés de disseny i construcció d'un drone destinat a realitzar treballs de fotogrametria. I la segona, consisteix en un estudi de la viabilitat de gravació d'àudio mitjançant una aeronau no tripulada i el posterior disseny del filtre corresponent.

El procediment contemplarà l'estudi de mercat actual existent sobre VANT's i un anàlisi acurat dels diferents models. Tot això seguit d'una bona descripció i comparació dels components i dispositius que conformen un drone. Un cop realitzada la part més teòrica centrada en recerca, comparació i selecció de components, es durà a terme la construcció de l'aeronau juntament amb l'equip tècnic de SITEP S.L i les posteriors proves de gravació d'àudio que es realitzaran en un entorn real com és un camp de vol.

La realització d'aquest projecte, haurà de tenir com a fonament principal, descriure els requeriments necessaris per al disseny i la construcció d'un VANT segons la finalitat d'aquest, i resoldre el dubte de si és possible dur a terme una gravació de so mitjançant una aeronau d'aquest tipus. Això últim pot donar pas a realitzar altres projectes en un camp per explorar, com és l'àudio.

Les conclusions es veuran afectades pel resultat final, ja que segons la viabilitat de la gravació de so mitjançant una gravadora embarcada en un VANT, es poden obrir noves portes per a la investigació acústica utilitzant aquestes aeronaus no tripulades que cada cop agafen un paper més important en l'actualitat.

Resumen

Este trabajo consta de dos partes claramente definidas en el proyecto. La primera está dirigida a describir todo el proceso de diseño y construcción de un drone destinado a realizar trabajos de fotogrametría. Y la segunda, consiste en un estudio de la viabilidad de grabación de audio mediante una aeronave no tripulada.

El procedimiento contemplará el estudio de mercado actual existente sobre VANT's y un análisis cuidadoso de los diferentes modelos. Todo ello seguido de una buena descripción y comparación de los componentes y dispositivos que conforman un drone. Una vez realizada la parte más teórica centrada en investigación, comparación y selección de componentes, se llevará a cabo la construcción de la aeronave junto con el equipo técnico de SITEP S.L y las posteriores pruebas de grabación de audio que se realizarán en un entorno real como es un campo de vuelo.

La realización de este proyecto deberá tener como fundamento principal, describir los requerimientos necesarios para el diseño y la construcción de un VANT según la finalidad del mismo, y resolver la duda de si es posible llevar a cabo una grabación de sonido mediante una aeronave de este tipo. Esto último puede dar paso a realizar otros proyectos en un campo por explorar, como es el audio.

Las conclusiones se verán afectadas por el resultado final, ya que, según la viabilidad de la grabación de sonido mediante una grabadora embarcada en un VANT, se pueden abrir nuevas puertas para la investigación acústica utilizando estas aeronaves no tripuladas que cada vez toman un papel más importante en la actualidad.

Abstract

This project consists of two clearly defined parts. The first part has the aim of describing the whole process of design and construction of a drone destined to carry out photogrammetry works. And the other part, consists of a study of the feasibility of recording audio through an unmanned aircraft.

The procedure will cover the current market study on VANT's and a careful analysis of the different models. Followed by a good description and comparison of the components and devices that make up a drone. Once the most theoretical part focused on research, comparison and selection of components has been carried out, the construction of the aircraft will be carried out along with the technical team of SITEP S.L and the subsequent audio recording tests that will be carried out in a real environment.

The realization of this project, must have as its main goal, describe the necessary requirements for the design and construction of a VANT according to the purpose of the latter, and resolve the question whether it is possible to carry out a recording of sound using an aircraft of this type. The latter can give way to other projects in a field to explore, such as audio.

The conclusions will be affected by the final result, since according to the viability of sound recording by means of a recorder embarked on a VANT, new doors can be opened for sound research using these unmanned aircraft that increasingly play a more important role in our society.

Agraïments

En aquest apartat, l'autor del treball fa una petita menció a totes i cada una de les persones que han fet possible la realització d'aquest projecte.

En primer lloc agrair immensament al tutor, el Manolo Manzanares Brotons, la seva implicació i entera disposició en qualsevol moment que ha estat necessària la seva ajuda i per dur un seguiment tan acurat del projecte en qüestió.

Pel que fa a l'empresa SITEP S.L. els vull donar les gràcies per haver-me donat la oportunitat de treballar amb ells durant aquests mesos. Donar gràcies al Juan Manuel Miras López per haver-me donat suport a tirar endavant el projecte i a facilitar-me tots els recursos de l'empresa que em fessin falta per a realitzar les proves de camp. Al Lucas Martínez Rodrigo, per la gestió de la logística i per donar-me la oportunitat de ser partícip dels projectes de l'empresa adquirint així uns coneixements molt més amplis del sector. També vull fer una especial menció a Felix Jiménez per haver estat el meu mentor dins de l'empresa durant tot aquest temps, haver-me transmès tots els seus coneixements i haver-me ajudat en la realització de les proves de camp com a pilot oficial dels drons. Com no pot ser d'altra manera, també estic infinitament agraït als meus companys de SITEP S.L. i en particular als del departament de Mobile Mapping per les hores d'oficina i taller, les vivències i els consells.

També valoro amb suma importància tot el suport i confiança que m'ha transmès la família, tan al llarg de la meva etapa universitària com en aquest últim període en qüestió.

Ja per acabar, vull agrair a totes les persones que han estat involucrades en aquest camí que he anat seguint, professors, companys i amics que d'alguna manera o altra han posat el seu granet de sorra, moltes gràcies a tots.

Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	IV
1. PREFACI	1
1.1. Origen del treball	1
1.2. Motivació	1
2. INTRODUCCIÓ	3
2.1. Objectius i abast del treball	3
3. DISSENY D'UN VANT	5
3.1. Que és un VANT i quines funcions pot desenvolupar	5
3.2. Classificació dels VANT	6
3.2.1. Tipus de drones segons el mètode de generació de sustentació	6
3.2.2. Tipus de drones segons el tipus d'ala	7
3.2.3. Tipus de drones segons l'aplicació	12
3.2.4. Tipus de drones segons característiques tècniques	13
3.2.5. Tipus de drones segons el nivell d'autonomia en la presa de decisions	14
3.2.6. Tipus de drones segons el pes màxim d'enlairament o MTOW (Maximum take-off weight)	15
3.3. Multirotors	15
3.4. Estructures mecàniques dels multirotors	16
3.4.1. Tricòpters	16
3.4.2. Quadcòpters	17
3.4.3. Hexacòpters	18
3.4.4. Octocòpters	19
3.5. Components d'un VANT	20
3.5.1. Xassís (frame)	20
3.5.2. Motors	20
3.5.3. Hèlixs	20
3.5.4. Regulador de velocitat o ESC	21
3.5.5. Bateries	22

3.5.6.	Controladora de vol	23
3.5.7.	PDB (Power Distribution Board)	24
3.5.8.	Antena GPS i brúixola.....	24
3.5.9.	Transmissor-receptor de telemetria.....	25
3.5.10.	Emissora	25
3.5.11.	Receptor de ràdio	26
3.6.	Selecció de components.....	26
3.6.1.	Selecció payload.....	26
3.6.2.	Selecció del xassís	27
3.6.3.	Motors, hèlixs i ESC.....	29
3.6.4.	Bateries	32
3.6.5.	Controladora de vol	33
3.6.6.	PDB (Power Distribution Board)	35
3.6.7.	Antena GPS i búixola.....	36
3.6.8.	Transmissor-receptor de telemetria.....	37
3.6.9.	Emissora	37
3.6.10.	Receptor de ràdio	38
3.6.11.	Gravadora de àudio	39
4.	ESTUDI DE GRAVACIÓ D'ÀUDIO	41
4.1.	Introducció a l'acústica	41
4.2.	Fonts sonores.....	43
4.2.1.	Tipus de fonts sonores.....	44
4.2.2.	Propagació del so en espais oberts	45
4.2.3.	Estudi dels micròfons.....	49
4.3.	Descripció de l'estudi de camp.....	50
4.4.	Caracterització del so de la font sonora	52
4.5.	Anàlisi d'espectre de freqüències	57
4.5.1.	Estudi amb MATLAB.....	57
4.5.2.	S-1000 – Dron gran	58
4.5.3.	DM - Dron Mitjà	61
4.5.4.	DP - Dron Petit	64
4.5.5.	Caracterització del so dels motors.....	65
4.6.	Filtratge de senyals	66
4.6.1.	Introducció als filtres.....	66
4.6.2.	Filtres analògics.....	68
4.6.3.	Filtres digitals	72

4.6.4.	Disseny d'un filtre	73
4.6.5.	Selecció del filtre i implementació	81
4.7.	Simulacions	90
5.	ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	93
6.	PLANIFICACIÓ	95
6.1.	Diagrama de Gantt.....	96
CONCLUSIONS	97
PRESSUPOST I/O ANÀLISI ECONÒMICA	99
BIBLIOGRAFIA	103
ANNEXOS	107

1. Prefaci

1.1. Origen del treball

Aquest projecte sorgeix a partir de les pràctiques curriculars realitzades a l'empresa SITEP S.L amb la necessitat de dur a terme uns treballs de fotogrametria específics per a un client extern. Sabent que l'empresa era força pionera en el sector de Mobile Mapping, resultava força interessant dur a terme un bon estudi del procés de disseny i fabricació d'un VANT.

L'altra part del projecte, sorgeix proposada per el propi tutor d'aquest treball i un altre professor de la universitat després d'observar que l'estudi de la gravació del so mitjançant una aeronau no tripulada era un sector que no s'havia explotat i que potser seria interessant de valorar. Així doncs després de proposar-ho a l'empresa i rebre el vist i plau es decideix tirar endavant amb la idea.

Aprofitant els coneixements i l'experiència dins el sector dels VANT per part de l'empresa i els seus treballadors, es va decidir tirar endavant el projecte de disseny i construcció del drone per a capturar dades fotogramètriques i per a poder fer un posterior estudi de la gravació d'àudio.

1.2. Motivació

En aquest projecte s'hi reflecteixen tant la motivació personal, al ser un tema escollit per l'estudiant i per tant del seu propi gust, com l'acadèmica al ser l'últim pas per finalitzar els estudis de grau.

A final de batxillerat, amb la realització del treball de recerca relacionat amb robots mini-sumo que lluiten en un ring de forma autònoma, neix la passió per l'electrònica de l'alumne en qüestió i per això decideix cursar el Grau en Electrònica Industrial i Automàtica. Però no és fins a finals dels estudis, al realitzar les pràctiques curriculars en una empresa especialitzada en el sector dels vehicles aeris no tripulats, quan l'estudiant en qüestió comença a agafar interès en aquest sector.

L'autor d'aquest treball, forma part de l'equip tècnic de SITEP S.L i des d'un primer moment se li assignen tasques molt diverses que li permeten tindre una visió global de tot el procés de disseny i construcció d'un VANT. A més, participar en les reunions tècniques de projecte per a supervisions i presa de decisions va donar fruit a l'increment d'aquesta motivació. El fet de ser tant partícip en l'activitat de l'empresa, fa néixer la idea principal d'aquest projecte per tal de poder aprofundir en cada un dels processos.

Cal remarcar el bon ambient de treball dins de l'oficina, amb una total mostra d'empatia envers l'estudiant. Fet que feia que es sentís recolzat i ajudat pels companys del departament tècnic en qualsevol moment de dubte o falta de coneixement.

Pel que fa a la motivació més de caire acadèmic, per una banda, cal remarcar que el fet de poder realitzar el projecte en un entorn laboral era un plus ja que els resultats podrien donar fruit a nous projectes. Per altra banda, el fet de treballar filtratges de senyal d'àudio suposa un repte interessant per a l'estudiant, ja que no ha treballat mai abans en aquest àmbit, ni durant els estudis ni de forma autònoma.

Finalment, la idea que al mateix temps que el treball aniria agafant forma, també ho faria l'experiència laboral de l'alumne, serviria també com a gran al·licient.

2. Introducció

2.1. Objectius i abast del treball

L'objectiu principal d'aquest projecte, tal i com indica el seu nom, és descriure detalladament el procés de disseny i construcció d'un VANT destinat a capturar dades fotogramètriques, a més de dur a terme un estudi de l'àudio gravat amb l'aeronau mitjançant el filtratge de les senyals de so.

La primera part d'aquest projecte es realitza amb col·laboració de l'empresa SITEP S.L i té l'objectiu de satisfer les necessitats d'una empresa externa, la qual vol obtenir uns aixecaments en tres dimensions (3D) d'uns abocadors de runa del territori.

Així doncs, per tal de complir amb la demanda del client i seguint les seves pautes marcades, son objecte del projecte els següents punts:

- Disseny o selecció del fusellatge
- Càlcul i selecció de components electrònics
- Càlcul i selecció dels motors
- Tests de motors
- Programació de la controladora de vol

Cal tenir present però, que no es objecte d'aquest projecte totes les tasques que es deriven després de la construcció i posta a punt del propi drone, com serien la captació de fotografies a camp i el post procés d'aquestes dades a l'oficina per tal de lliurar el resultat final al client.

Pel que fa a la segona part del projecte, té com a objectiu principal estudiar la viabilitat de la gravació de so des de l'aire mitjançant un VANT. Es a dir, comprovar si es possible realitzar un filtratge prou bo de la senyal com per anular el so emès per els motors de l'aeronau.

La idea pretén comprendre tot el procés de disseny i construcció, des de la necessitat del client fins a l'últim pas que vindria a ser el muntatge complet i comprovacions del correcte funcionament del drone. Durant aquest trajecte es preveu dur a terme una bona recerca i ús solvent dels recursos, tal i com s'espera de qualsevol tasca d'enginyeria. A més, l'empresa dona gran importància a la qualitat del producte ofert al client, factor molt important i determinant a l'hora de tirar endavant qualsevol decisió o iniciativa dins el projecte.

3. Disseny d'un VANT

3.1. Que és un VANT i quines funcions pot desenvolupar

Les sigles VANT signifiquen vehicle aeri no tripulat, i tal i com indica el seu nom, es refereix a qualsevol tipus d'aeronau reutilitzable capaç de mantenir de forma autònoma un règim de vol controlat i sostingut, ja sigui propulsat per motors de combustió, elèctrics o de reacció.

Aquets dispositius aeris son coneguts també amb diferents nomenclatures com poden ser UAV (Unmanned Aerial Vehicle), dron / drone i RPA (Remotely Piloted Aircraft) entre altres.

Actualment el disseny dels VANT compta amb una ampla varietat de morfologies, configuracions, dimensions i característiques segons l'aplicació a que estiguin destinats.

Pel que fa a les funcions que poden desenvolupar, estem davant un camp en creixement continu, ja que són capaços de realitzar tasques molt diverses i cada cop més complexes. En un principi, són màquines pensades per a facilitar la vida humana, és a dir realitzar tasques avorrides, perilloses o complicades de realitzar per l'esser humà.

A continuació es citen algunes de les aplicacions més comunes que actualment es duen a terme mitjançant VANTs:

- Cartografia: Realització d'ortofotomapes i de models d'elevacions del terreny d'alta resolució.
- Transport i entrega de mercaderies
- Filmacions de cinema, esports extrems, esdeveniments multitudinaris, desfilades de moda, etc.
- Distribució de senyals (internet, WIFI, etc.)
- Serveis forestals: control d'incendis i seguiment de la vegetació de la zona.
- Recerca de persones
- Medi ambient: estat de l'atmosfera.
- Seguretat i control de fronteres.
- Gestió de patrimoni
- Seguiment de la planificació urbanística
- Geologia, hidrologia, topografia i zoologia.
- Revisió d'infraestructures.

A part de les aplicacions citades, n' existeixen moltes més en les que encara no s'ha investigat d'una forma acurada, com és el cas del so (factor que es treballarà en aquest projecte).

3.2. Classificació dels VANT

A causa de la gran diversitat de tipus de drones existent i a les múltiples tasques que aquests poden executar, no hi ha una classificació universalment acceptada, sinó múltiples taxonomies que s'acostumen a entremesclar.

Alguns dels mètodes de classificació més usats actualment són:

- Mètode de generació de sustentació
- Tipus d'ala
- Aplicació
- Dimensions, autonomia, pes, alçada de vol i abast màxim
- Nivell d'autonomia en la presa de decisions
- Pes màxim d'enlairament MTOW (Maximum take-off weight)

A continuació es descriu més detalladament cada una de les formes de classificació citades.

3.2.1. Tipus de drones segons el mètode de generació de sustentació

Aquest criteri de classificació agrupa tots els drones en dos grans grups, els aerodines i els aeròstats. Aquests primers conformen totes les aeronaus més pesades que l'aire, mentre que el segon grup està compost per tots aquells vehicles aeris els quals la seva suspensió és deguda a l'ús d'un gas més lleuger que el propi aire.

A les següents figures es presenta l'esquema d'aquesta classificació:

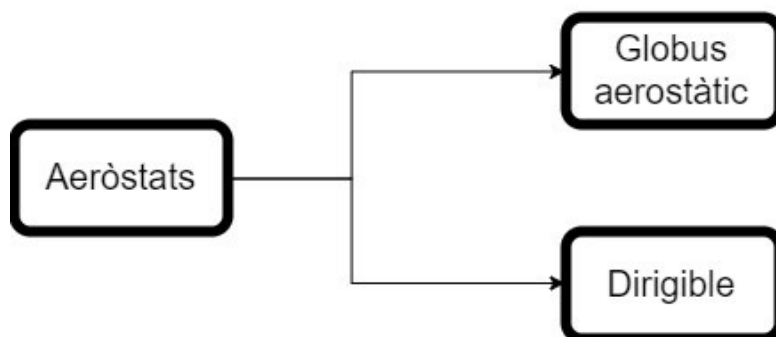


Figura 3.1 - Tipus de drones aeròstats segons el mètode de sustentació

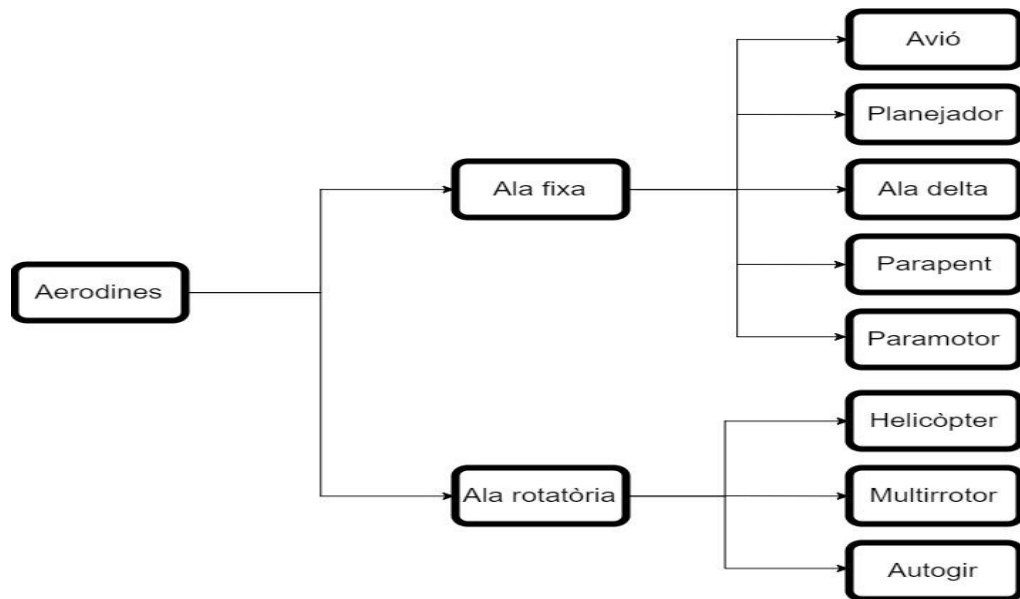


Figura 3.2 - Tipus de drones aerodines segons el mètode de sustentació

Actualment els més usats són els aerodines degut a que les característiques que presenten donen més facilitat i flexibilitat a la realització d'una àmplia gamma d'aplicacions.

3.2.2. Tipus de drones segons el tipus d'ala

Dins el grup de aerodines, un altre mètode de classificació és segons el tipus d'ala. Això ens duu als tres grups següents:

- Drones d'ala fixa
- Drones d'ala rotatòria
- Drones Híbrids

3.2.2.1. Drones d'ala fixa

Aquest grup comprèn tots aquells vehicles aeris en els quals les ales es troben unides o encastades amb la resta d'elements i no posseeixen moviment propi. Aquestes aeronaus generen la sustentació bàsicament per plans de vol en els que el seu perfil aerodinàmic està dissenyat específicament per a crear una diferència de pressió entre l'intradós (part inferior) i l'extradós (part superior).

Depenent de la ubicació de l'ala, aquests es poden subdividir en drones d'ala alta, mitja, baixa i ala volant.

Els d'ala alta, com es pot intuir pel seu nom, són tots aquells que tenen l'ala ubicada a la part superior del fusellatge. I es caracteritzen per proporcionar una gran estabilitat en detriment de la maniobrabilitat.

Els d'ala mitja contenen amb un equilibri entre estabilitat i maniobrabilitat gràcies a la ubicació de l'ala a la part intermèdia del xassís.

Tal i com es pot intuir pel que s'ha comentat anteriorment, els d'ala baixa faciliten la maniobrabilitat al portar l'ala a la part inferior del vehicle.

Finalment els drones d'ala volant són aquells en que l'ala conforma la major part del fusellatge, inclús en alguns casos no es diferencia el xassís de l'ala. Aquests presenten una elevada maniobrabilitat degut a la baixa resistència aerodinàmica.

A continuació es presenten unes fotografies a mode d'exemple de cada un dels tipus esmentats:



Figura 3.3 - Drone d'ala alta (Font: [1].
www.acgdrone.com)



Figura 3.4 - Drone d'ala mitja (Font: [2].
www.RCAviones.com)



Figura 3.5 - Drone d'ala baixa (Font: [3].
www.Mundodron.com)



Figura 3.6 - Drone d'ala volant (Font: [4].
www.FYTech.com)

En general, els drones d'ala fixa es caracteritzen per la seva estructura simple i l'elevada eficiència aerodinàmica que els permet tenir un alt rendiment energètic. Així doncs, podem dir que permeten presentar una l'autonomia en règim de vol relativament elevada.

No obstant això, aquestes aeronaus requereixen d'infraestructures i/o elements per a poder realitzar l'enlairament i el posterior aterratge, la qual cosa augmenta el nivell de complexitat en l'execució dels vols. A més la maniobrabilitat és molt menor a la dels d'ala rotatòria, el que els impedeix ser utilitzats en espais d'extensió limitada.

3.2.2.2. Drones d'ala rotatòria

Aquest grup engloba totes les aeronaus, les quals les seves ales, o també anomenades "pales", giren al voltant d'un eix, aconseguint d'aquesta forma la sustentació. Aquestes, segons el nombre de rotors i la seva configuració, es poden subdividir en els següents tipus:

1. Aeronaus amb rotor principal i rotor de cua

En aquest tipus de drone, la sustentació és generada per el rotor principal, el qual està situat a la part superior de l'aparell, mentre que el rotor de la cua compensa el parell de torsió que produeix el primer. Es caracteritzen per tenir una bona capacitat de control y maniobrabilitat. No obstant això, l'estructura mecànica és força complexa.



Figura 3.7 - Drone amb rotor principal i rotor de cua (Font: [5]. www.aliexpress.com)

2. Drone amb un únic rotor

Aquests drones també són coneguts com a "singlerotor", ja que compten amb un únic rotor per generar la sustentació i un bon disseny d'alerons per contrarestar el parell de torsió. L'estructura mecànica és relativament simple, però són complicats de manejar o controlar, inclús per pilots experimentats.



Figura 3.8 - Drone amb un únic rotor (Font: [6]. www.Drone-forum.com)

3. Drone amb dos rotors en configuració coaxial

En aquesta configuració les aeronaus consten de dos rotors col·locats un sobre l'altre i els dos giren en sentits oposats, aconseguint així enlairar-se a partir de la diferència generada per la velocitat angular d'ambos rotors. La configuració coaxial permet la fabricació de vehicles més compactes, però té com a inconvenient que bona part de l'energia generada és perd degut a que els dos rotors s'interfereixen entre si.



Figura 3.9 - Drone amb dos rotors en configuració coaxial (Font: [7]. www.Alibaba.com)

4. Drones amb dos rotors en configuració tàndem

Aquests drones estan formats per dos rotors ubicats a la part superior de l'aparell en configuració tàndem. Els dos rotors giren en direccions oposades per neutralitzar el parell de torsió. L'estructura mecànica d'aquestes aeronaus és extremadament complexa.



Figura 3.10 - Drone amb dos rotors en configuració tàndem (Font: [8]. www.Aviationweek.com)

5. Multirotors

Finalment, els drones multirotors són la última família d'ala rotatòria. Aquests són tots aquells que posseeixen tres o més rotors. Més endavant, es parlarà de forma més detallada sobre aquests tipus d'aeronaus.



Figura 3.11 - Drone multirotor (Font: [9]. www.Pinterest.com)

En el seu conjunt, els tipus de drones d'ala rotatòria poden enlairar-se o aterrar de forma vertical sense requerir d'infraestructures externes. Aquest tipus d'aeronaus presenten un nivell alt de maniobrabilitat, podent realitzar des de vols estacionaris fins a la realització de maniobres d'elevat nivell de precisió, el que permet dur a terme missions tant en espais interiors com exteriors. També són capaços de volar a altures molt baixes respecte al terra, el que permet captar imatges amb un elevat nivell de resolució. A més, a causa de la seva mecànica de vol, posseeixen una bona capacitat de càrrega de pagament.

No obstant això, en necessitar que tots els seus rotors estiguin funcionant permanentment per aconseguir la sustentació necessària, aquestes aeronaus presenten temps d'autonomia de vol força limitats, ja que tenen un consum energètic molt elevat. Aquest fet, fa que els drones d'ala rotatòria estiguin limitats a sobrevolar àrees relativament petites.

3.2.2.3. Drones híbrids

Aquest tipus de RPAs són capaços d'enlairar-se i aterrar de forma vertical igual que les aeronaus d'ala rotatòria, i de realitzar vols a alta velocitat com els d'ala fixa tradicionals.

Aquests vehicles posseeixen redundància de mecanismes de sustentació, el que converteix a aquesta solució en una opció robusta davant errors de vol inesperats. No obstant això, la seva estructura mecànica i de control és molt complexa. Fruit d'aquesta complexitat, actualment hi ha molt poca oferta comercial d'aquest tipus de drones, i les aeronaus que es troben al mercat, tenen uns preus summament elevats.

3.2.3. Tipus de drones segons l'aplicació

Els VANT, segons l'aplicació per la qual estan dissenyats, es poden dividir en civils i militars. Per una banda, aquests primers són els que estan destinats a cobrir algunes de les necessitats de la societat, com per exemple:

- Filmografia
- Inspecció d'obra civil
- Reconeixement i presa de dades en zones de desastre
- Oci i entreteniment
- Aixecament de mapes
- Vigilància fronterera
- Transport de paqueteria

- Recerca i rescat
- Monitorització i control d'incendis
- Supervisió de trànsit vehicular
- Localització de recursos naturals
- Monitorització de contaminació atmosfèrica
- Control de cultius
- Altres

D'altra banda, els drones militars són usats per dur a terme una àmplia varietat de tasques de suport, com poden ser:

- Vigilància, intel·ligència i reconeixement
- Esquers per a pràctiques d'artilleria
- Missions d'atac (equipats amb míssils aire-terra, míssils aire-aire, bombes guiades per làser, etc.)
- Atacs de guerra electrònica (equipats amb generadors de polsos electromagnètics, etc.)

3.2.4. Tipus de drones segons característiques tècniques

Una altra forma de classificar els diferents tipus de drones, és segons les seves característiques tècniques, com poden ser la massa, l'abast, l'alçada de vol i l'autonomia. A la següent taula es mostra aquesta classificació:

Tipus	Massa (kg)	Abast (km)	Alç. de vol (m)	Autonomia (h)
Micro	<5	<10	250	1
Mini	<20/25/30/150	<10	150/250/300	<2
Tactical				
Close range (CR)	25-150	Oct-30	3000	2 a 4
Short range (SR)	50-250	30-70	3000	3 a 6
Medium range (MR)	150-500	70-200	5000	6 a 10
MR endurance (MRE)	500-1500	>500	8000	10 a 18
Low altitude deep penetration (LADP)	250-2500	>250	50-9000	0.5-1
Low altitude long endurance (LALE)	15-25	>500	3000	>24

Medium altitude long endurance (MALE)	1000-1500	>500	3000	20 a 48
Strategic				
High altitude long endurance (HALE)	2500-5000	>2000	20000	24-48
Stratospheric (Strato)	>2500	>2000	>20000	>48
Exo-Stratospheric (EXO)	TBD*	TBD	>30500	TBD
Special task				
Unmanned Combat Aerial Vehicle (UCAV)	>1000	1500	12000	2
Lethal	TBD	300	4000	3 a 4
Decoys (DEC)		0-500	50-5000	<4

Taula 3.1 – Tipus de drones segons les característiques tècniques

*TBD: to be defined

3.2.5. Tipus de drones segons el nivell d'autonomia en la presa de decisions

També podem classificar les diferents aeronaus segons el nivell d'autonomia en la presa de decisions o ACL (Autonomous Control Levels). La taula que es mostra a continuació va des del nivell 0 que compren les aeronaus que depenen totalment d'un pilot remot per a la presa de decisions, fins al valor 10 en que el vehicle ja és capaç de prendre tota classes de decisions de forma autònoma.

ACL	Level descriptor
0	Remotely piloted vehicle
1	Execute preplanned mission
2	Changeable mission
3	Robust response to real-time faults/events
4	Fault/event adaptive vehicle
5	Real-time multi-vehicle coordination
6	Real-time multi-vehicle cooperation

7	Battlespace knowledge
8	Battlespace cognizance
9	Battlespace swarm cognizance
10	Fully autonomous

Taula 3.2 – Tipus de drones segons el nivell d'autonomia en la presa de decisions

3.2.6. Tipus de drones segons el pes màxim d'enlairament o MTOW (Maximum take-off weight)

En la taula que es mostra a continuació podem observar la classificació segons el MTOW:

Class	MTOW	Range category	Typical max altitude (ft*)
0	<= 25	Close range	1000 ft
1	25-500	Short range	15000 ft
2	501-2000	Medium range	30000 ft
3	>2000	Long range	Above 30000 ft

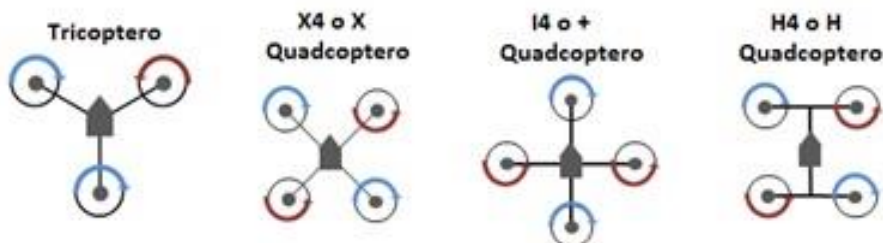
Taula 3.3 – Tipus de drones segons pes màxim d'enlairament

*ft: foot (peus)

3.3. Multirotors

Tal i com s'ha comentat amb anterioritat, els VANT multirotors són tots aquells que consten de tres o més rotors per a generar la sustentació.

Depenent del nombre i de la seva configuració, poden subdividir-se en diferents tipus, anant des d'aeronaus amb tres rotors (tricòpters o trirotors), quatre (quadcòpters o quatrirrotors) fins a configuracions de vuit (octocòpters) o més rotors.



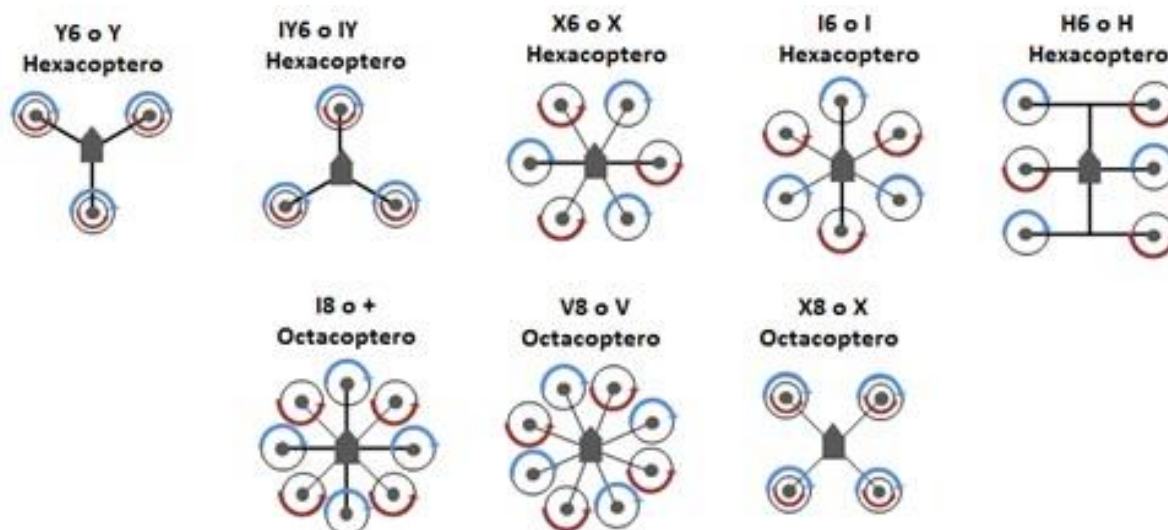


Figura 3.12 - Tipus de multirotors (Font: [10] www.xdrones.com)

Els multirotors són aeronaus d'una configuració mecànica molt senzilla i de fàcil fabricació, això, sumat a la seva versatilitat, ha fet d'aquests vehicles l'opció més popular entre els RPAs per a ús civil.

Igual que altres tipus de drones d'ala rotatòria, els multirotors generen la sustentació necessària per al vol a través dels seus rotors, encara que en aquest cas, les hèlixs són de pas fix (angle fix) i de revolucions variables. Les "pales" són instal·lades en sentits de rotació oposats de forma diametral, és a dir, s'alternen les de gir horari i antihorari resultant nul·la la suma de les forces que generen.

Mitjançant la variació d'aquestes forces es permet la maniobrabilitat d'aquest tipus d'aeronaus. Si tots els rotors produeixen la mateixa força de sustentació i aquesta es troba en equilibri amb el pes de l'aeronau, l'aparell es mantindrà en règim de vol estacionari. Al variar la velocitat angular d'algun dels rotors respecte als altres, es produeix el balanceig.

3.4. Estructures mecàniques dels multirotors

Tal i com s'ha mencionat amb anterioritat, existeixen una gran varietat de configuracions mecàniques per als multirotors. En aquest apartat es farà un anàlisi dels avantatges i inconvenients que suposa cada una de les principals estructures en front a les altres.

3.4.1. Tricòpters

Els tricòpters són totes aquelles aeronaus que consten de tres rotors. Aquests tenen dos rotors que giren en direccions oposades, però hi ha un rotor que produeix un parell que intenta girar el tricòpter.

A causa d'això, els tricòpters solen utilitzar un servo posterior per inclinar el rotor del darrera i així compensar aquest parell, de la mateixa manera que ho fa un rotor de cua d'helicòpter. A continuació, es mostren els principals avantatges i inconvenients d'aquest tipus d'estructura.

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> • Molta agilitat. • Separació de 120° entre braços permet gran flexibilitat per muntar la càmera. • Preu baix al portar menys motors i ESC. • Són petits i lleugers. • Autonomia força elevada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Són vulnerables. • Menys possibilitat d'aguantar xocs. • Si un motor falla, es desploma. • Són complexes de manejar. • No són molt acrobàtics.

Taula 3.4 – Avantatges i inconvenients dels tricòpters

Finalment, podem extreure la conclusió, que tot i els avantatges que ofereix, un tricòpter no és una bona solució per a treballs de fotogrametria on es necessiti gran precisió, ja que no és un aparell molt estable.

3.4.2. Quadcòpters

Els Quadcòpters, són les aeronaus formades per quatre rotors. Actualment és el multicòpter més popular del mercat, ja que és ràpid, fàcil de fabricar i amb preus molt assequibles. Aquests VANT utilitzen quatre hèlixs per garantir que es mantingui la sustentació. Normalment, el disseny que forma l'estructura dels motors i braços es basa en un quadrat o rectangle al voltant del cos.

A la taula següent es mostra un recull d'avantatges i inconvenients d'aquests multicòpters:

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> • 4 hèlixs proporcionen molt més poder per alçar-se del sòl. • Preu baix comparació amb el pes que pot suportar. • Relativament barats de fabricar. • Gran maniobrabilitat. • Fàcil d'afegir accessoris 	<ul style="list-style-type: none"> • No poden aixecar tant pes com un hexacòpter o un octocòpter. • Estabilitat més baixa que la d'un hexa o octo.

Taula 3.5 – Avantatges i inconvenients dels quadcòpters

Per als aficionats, els Quadrcòpters són l'opció més escollida, ja que són models molt presents en el mercat, fàcils de reparar i costen molt menys que els seus homòlegs. Les característiques que presenten són pràcticament envejables, però en cas que necessitis una gran precisió (fotogrametria), cal optar per una solució més estable.

3.4.3. Hexacòpters

Els Hexacòpters són el següent pas després dels quadrcòpters. Aquests models, com es pot imaginar, tenen sis motors amb les seves hèlixs corresponents. Això augmenta la capacitat de càrrega de l'aeronau i fa que aquesta sigui una bona opció per aquells que utilitzen càmeres costoses a bord. Principalment aquests VANT compten amb els mateixos avantatges importants d'un quadrcòpter però amb molt més afegit.

- Potència: Aquests models tenen velocitats més altes i més potència a causa dels dos motors addicionals inclosos.
- Alçada: Aconsegueixen molta més alçada de vol i assoleix elevacions més altes amb facilitat.
- Seguretat: Al disposar de 6 motors, un pot fallar mentre la resta compensi la pèrdua de velocitat angular. Això implica poder aterrar el drone amb seguretat fins i tot si un o inclús dos dels motors fallen. Si són dos, dependrà de la posició d'aquests, si són contigus, les maniobres seran molt més complicades.

Així doncs, podem resumir els avantatges i inconvenients d'aquesta estructura en la següent taula:

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> • Major potència, velocitat i elevació. • Major seguretat proporcionada pels motors addicionals. • Major càrrega útil global. • Gran control i velocitat de vol. 	<ul style="list-style-type: none"> • Preu superior al d'un tricòpter o Quadrcòpters. • Més gran de mida, fent que sigui més difícil volar en espais reduïts. • Les parts del VANT són més costoses si han de ser substituïdes.

Taula 3.6 – Avantatges i inconvenients dels hexacòpters

Un hexacòpter és un molt bon compromís entre el rendiment i el preu. Encara que són més cars que els Quadrcòpters, aquests models funcionen excepcionalment bé i són molt menys costosos que els octo. Però continuen sense ser la solució més òptima per a treballs de fotogrametria a gran resolució.

3.4.4. Octocòpters

L'octocòpter té tots els avantatges que es veuen en els hexacòpters, però encara amb més èmfasi. Aquests models, no són precisament barats, però són capaços de capturar les millors imatges aèries i per tant l'opció més escollida per als professionals de la fotografia i gravació de vídeo.

Aquests models com es pot intuir pel seu nom, consten de 8 motors amb les seves corresponents hèlixs. Els motors proporcionen el mateix benefici que l'hexacòpter enfront el quadcòpter:

- Velocitat: Molt més ràpids que qualsevol altra de les configuracions anteriors.
- Control: Estabilitat sorprenent davant situacions adverses com el vent o la pluja.
- Seguretat: Capacitat de seguir volant en cas de perdre qualsevol motor, igual que en el cas de l'hexacòpter. A més pot perdre fins a dos 2 o 3 motors sense que l'embarcament caigui, segons el posicionament i la càrrega útil general.

A la següent taula es mostra un recull dels avantatges i inconvenients d'aquesta configuració mecànica:

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> • Gran velocitat i agilitat. • Gran seguretat per la redundància de motors. • Major càrrega útil global, fet que permet embarcar equips de càmera pesats . • Permet aconseguir elevacions excepcionalment altes. • Gran control i estabilitat de vol. 	<ul style="list-style-type: none"> • Preu molt elevat per la quantitat de motors. • Proporcions grans que dificulten el vol en espais reduïts. • Reparacions costoses. • Autonomia reduïda.

Taula 3.7 – Avantatges i inconvenients dels octocòpters

EL cost i l'autonomia de la bateria són els principals factors de preocupació. No obstant això, per a realitzar un bon treball de fotogrametria i aconseguir una alta precisió, és el preu que s'ha de pagar. A més, poc a poc aniran sortint models mes eficients i el cost s'anirà normalitzant.

L'octocòpter és sens dubte a millor solució si es requereix un equip capaç de suportar fortes ventades i aixecar els millors equips de fotografia (no solen ser massa lleugers) tot mantenint una bona estabilitat.

3.5. Components d'un VANT

En aquest apartat es fa una petita descripció de cada un dels components principals que conformen un VANT explicant la seva funcionalitat i la importància del paper que desenvolupa dins l'aeronau.

3.5.1. Xassís (frame)

El xassís o frame en anglès, és l'esquelet del multirotor. Es pot dir que és l'estructura que dona forma al multicòpter i on s'instal·len totes les altres parts que conformaran l'aeronau. Tal i com es pot imaginar existeix una gran varietat de dissenys, segons el tipus de nau que es vol construir. També hi ha molta diversitat segons el material amb que estan construïts.

Normalment les estructures solen ser de fibra de carboni, ja que és un material molt lleuger i resistent, encara que també és comú trobar-ne d'altres materials com alumini, fibra de vidre, Kevlar, etc.

3.5.2. Motors

Els motors són els encarregats de transformar l'energia elèctrica en energia cinètica, en forma de moviment circular, que es transmetrà a l'hèlix i produirà una empenta que permetrà a l'aeronau elevar-se i desplaçar-se per l'aire. El conjunt de motors han d'estar perfectament equilibrats per tal d'aconseguir una autonomia de vol òptima.

Els fabricants realitzen proves i assajos per tal d'oferir diferents models i l'usuari pugui escollir el que millor s'ajusti al seu RPA (Remotely piloted aircraft) en funció de la càrrega que hagi d'eleva, el nombre de motors, autonomia desitjada, dimensions i pas d'hèlix, etc.

Cal tenir en compte que un bon motor pot deixar de ser-ho si no se li acobla l'hèlix adequada o recomanada per a ell.

Existeixen dos tipus de motors elèctrics, els normals amb escombretes, i els brushless, que són sense escombretes. Els utilitzats en els multirotors són els brushless degut a que són molt més eficients al no produir-se tant desgast en el seu ús.

3.5.3. Hèlixs

Les hèlixs estan fabricades en diferents mides i materials com el compost de niló o fibra de carboni per exemple. Són les encarregades de, transmetre l'empenta suficient per cada parell de motors que giren en sentits oposats.

Cada hèlix ve determinada per dues xifres (Exemple: 50/30) on el primer dígit representa la longitud de la mateixa i el segon el pitch o pas d'hèlix, ambdós expressats en polzades. Això significa que per cada volta completa de l'hèlix, aquesta podria avançar 30" en la direcció de gir. A major longitud d'hèlix major és l'empenta i també major consum de corrent. Per aquest motiu, és molt important l'ús de les hèlix recomanades pel fabricant del motor, ja que seran les més adequades per al model i per tant més eficients.

3.5.4. Regulador de velocitat o ESC

Els reguladors de velocitat o ESC (Electronic Speed Control) són els responsables de proporcionar electrònicament les revolucions necessàries a cada motor / hèlix de manera individual en un moment determinat per tal que l'aeronau sigui capaç de realitzar diferents moviments com elevacions, rotacions, translacions, acrobàcies, etc.

Els variadors són un element essencial per al dron. És molt freqüent el seu ús en el món de l'aeromodelisme i especialment en qualsevol tipus de dispositiu que realitzi vols mitjançant motors brushless. Les dimensions d'aquests depenen molt del model i de si porten incorporat un BEC (Battery Elimination Circuit), en aquest cas tindran un volum més gran, o no.

Els ESC són un sistema capaç de definir la velocitat de gir del motor mitjançant la generació de polsos. Aquests dispositius es componen de les següents parts:

- Dos cables corresponents a l'entrada de l'alimentació de la bateria.
- Tres cables que es connecten al motor per proporcionar-li l'alimentació mitjançant polsos.
- Un connector amb dos o tres cables que es connecta a la controladora de la qual rep les dades per moure el motor. El nombre de cables depèn de si l'ESC porta incorporat un BEC (3 cables) o no (2 cables).
- L'ESC que conté la part electrònica i fa possible el seu funcionament

El funcionament bàsic d'un ESC consisteix en una sèrie d'instruccions. En primer lloc, la controladora envia les dades, calculades en funció de la posició del dron i del stick de la ràdio de comandament del pilot, a través del connector corresponent. Un cop el variador rep la informació, capta l'energia necessària de la bateria a través dels cables d'alimentació. A continuació, l'electrònica s'encarrega de fer la traducció en format de polsos i finalment és enviat al motor a través dels tres cables per a que el motor es posi en funcionament.

3.5.5. Bateries

Les bateries són les encarregades de proporcionar l'energia necessària per a fer funcionar el drone i tots els seus dispositius. Són components molt pesats, pel que és essencial que siguin capaces de tenir una bona relació pes i capacitat de maximitzar l'autonomia de vol de l'aparell.

Les mes utilitzades actualment són les de Li-Po (Polímer de Liti) a causa de la seva densitat d'energia, el seu baix pes i la seva alta taxa de descàrrega, que és ideal per a maniobres àgils com les d'un multirotor.

Les bateries normalment es componen de varies cel·les individuals les quals tenen definits uns valors de tensió específics, que en el cas de les de Li-Po són:

- Tensió nominal: **3.7V**
- Tensió màxima: **4.2V**
- Tensió final de descàrrega: **3.2 V**
- Tensió d'emmagatzematge o storage: **3.85V**

Cal tenir en compte que al desconnectar la bateria del carregador, la seva càrrega disminueix una mica respecte del que indica el carregador, és el que es coneix com a assentament de la càrrega. Per això, si per exemple es desconnecta una bateria en la qual s'indica una càrrega de 3,85 V just al desconnectar-la marcarà 3,80 V aproximadament, a causa d'aquesta baixada de tensió. Per tant, si volem que la càrrega final de la bateria sigui de 3,85 V haurem de deixar-la connectada al carregador fins que aquest indiqui un voltatge de 3,90 V aproximadament.

Es important no excedir la tensió final de descàrrega, del contrari estarem disminuint la vida útil de la bateria. També és important l'ús de cables balancejadors a l'hora de carregar les bateries. Aquests permeten que totes les cel·les es carreguin al mateix temps, evitant així que unes es carreguin més que altres. Per assegurar el major rendiment de les bateries és molt important que totes les cel·les es carreguin i descarreguin de manera uniforme.

Les bateries mai s'han d'emmagatzemar durant molt temps completament carregades o amb el seu nivell de càrrega mínima, és per això que els fabricants recomanen una tensió storage o d'emmagatzematge de 3,85V per a garantir la màxima conservació d'energia possible i evitar reduir la vida útil d'aquestes.

En quant al nombre de cel·les i la seva distribució, ve determinat per dos terminologies:

- La lletra “s”: indica quantes cel·les es troben connectades en sèrie. Al augmentar el nombre de cel·les, també augmenta la tensió total d'aquesta. Per exemple una bateria Li-Po de 6s, no té 3.7V sinó que té una tensió nominal de 22.2V.
- La lletra “p”: indica quantes cel·les estan connectades en paral·lel dins el paquet de la bateria. Per tant a major nombre de cel·les la capacitat augmenta, però no la tensió de sortida. Per tant la capacitat d'una bateria “2p” serà el doble que la de “1p”, però el voltatge que entrega serà el mateix. Cal tenir en compte que “p” equival a dos blocs de bateries en paral·lel i que per tant “2p” implica tres blocs.

Un altre factor important de les bateries és la capacítància (expressada en mAh). Aquesta indica la quantitat màxima d'energia que és capaç d'entregar o subministrar en un moment determinat. Això implica, a mode d'exemple, que una bateria de 2000mAh és capaç d'entregar una intensitat de 2A durant una hora fins a descarregar-se completament. Però, per tal d'allargar la vida útil de les bateries al màxim, és necessari que aquestes conservin sempre part de la seva càrrega. Per aquest motiu, és recomanable limitar el seu ús fins a la capacitat residual o de reserva, que equival al 20% del la capacitat total.

La velocitat de descàrrega indica la rapidesa amb que es pot extreure la corrent de la bateria sense que aquesta es danyi. Aquest valor s'expressa amb una C. Pel que fa a la velocitat de càrrega, també es quantifica amb C.

3.5.6. Controladora de vol

La controladora de vol és coneguda com el cervell de la màquina. Aquesta mesura i controla tot el que passa al multirotor i pràcticament tots els components van connectats a ella d'alguna forma.

Interpreta l'entrada del receptor, el mòdul GPS, l'estat de la bateria, l'IMU (inertial measurement unit) i altres sensors embarcats. Regula les velocitats dels motors a través dels variadors o ESC, també governa els disparos de fotografies de la càmera o altres payloads.

Controla pilots automàtics, rutes de navegació, estat de seguretat del vehicle i moltes altres funcions autònomes. És fonamental per a tot el funcionament de l'aeronau.

L'IMU, que s'ha mencionat anteriorment, és un dispositiu electrònic que mesura i informa sobre la velocitat, orientació i forces gravitacionals de l'aparell, usant normalment una combinació de 3 acceleròmetres i 3 giroscopis. Sol estar incorporada en la mateixa controladora de vol.

3.5.7. PDB (Power Distribution Board)

La PDB és bàsicament una placa de distribució de corrent per evitar cablejats. És un element essencial dins el món dels multirotors, ja que facilita infinitament el muntatge i l'ampliació d'aquest, amb nous components per exemple.

Aquesta varia de format i dimensions segons les característiques que presenta. La seva funció bàsica és la de distribuir l'energia que li arriba de la bateria als diferents components electrònics que incorpora el drone en qüestió.

Evidentment segons els dispositius embarcats i les seves característiques, serà necessària una PDB més o menys complexa. És molt habitual que les plaques portin incorporat algun BEC (Battery Eliminator Circuit), un element que actua com a transformador de potència, adaptant el voltatge de la bateria a un voltatge acceptat pel sensor o l'element que es vulgui connectar.

També es troben PDBs que disposen d'un filtre LC, aquest filtre compost essencialment per ferrita i condensadors, proporciona una línia sense interferències electromagnètiques, ideal per a connectar el sistema de vídeo i garantir una bona qualitat d'imatge.

3.5.8. Antena GPS i brúixola

Per les seves sigles, GPS significa Sistema de Posicionament global. L'antena GPS integrada en els drones compleix les mateixes funcions que el GPS en els automòbils, o en qualsevol altre aparell; però aquesta inclou algunes característiques més; també serveix per afegir les dades de localització a la telemetria, a més de les dades de velocitat i altitud.

Aquesta antena GPS també té incorporada una brúixola electrònica (o magnetòmetre) independent de la controladora de vol i que es troba allunyada de la bateria, de cables de distribució i dels reguladors de velocitat o ESC, que causen interferències no desitjades. El corrent continu dels cables de distribució, és tant, que genera un gran camp magnètic que pot danyar el magnetòmetre, ocasionant un problema com la desviació de l'orientació o moviments en espiral del dron. Amb aquesta brúixola, que conté informació del camp magnètic de la terra i de la declinació que proporciona el GPS, es sabrà sempre la posició del nord.

Per evitar les interferències, és recomanable muntar el magnetòmetre en una posició superposada o elevada, que es trobi el més allunyat possible dels objectes metàl·lics pels quals circuli corrent.

Aquesta antena va connectada a la controladora de vol, permetent així que aquesta conegui la ubicació (latitud i longitud), altitud i velocitat exactes del multirotor.

En drons més avançats, amb una placa controladora de vol que accepta l'opció de vol programat, també inclou una funció que manté guardada la posició estàtica o d'enlairament perquè el dron sigui capaç de tornar al seu punt de partida en cas que se li estigui esgotant la bateria. També pot ser capaç de volar en certa direcció o cap a punts predefinits i a velocitat relativa.

3.5.9. Transmissor-receptor de telemetria

El mòdul o equips transmissors-receptors de telemetria embarcats en l'aeronau, tenen la funció de mostrar a temps real i a través de l'emissora, les dades de vol així com l'estat del nostre RPA (Remotely piloted aircraft), mitjançant la transmissió d'informació útil com pot ser la velocitat, altitud, estat de les bateries, temps de vol, etc.

3.5.10. Emissora

L'emissora és el comandament a través del qual es controlarà l'aeronau. Normalment aquestes treballen en freqüència de 2.4 GHz per tal d'evitar possibles interferències d'altres emissores, encara que antigament s'utilitzava la banda de 35 MHz que era molt més susceptible a sofrir interferències.

Cada emissora té un número de canals específic, i per tant a l'hora de seleccionar-la cal tenir clar quines característiques volem usar i el nombre de modes de vol que farem servir entre altres factors. S'ha de tenir en compte que el nombre de canals de l'emissora ha de ser superior, com a mínim en 4 unitats (per als 4 canals assignats als stick principals: ele, rud, thro i pich) al nombre total de canals de la controladora.

Ja es tracti d'un dron senzill o d'un més complex i sofisticat, la majoria tenen dos comandaments de control que acostumen a realitzar les següents funcions:

- **El comandament esquerre (en l'eix vertical):** aquest és l'accelerador del dron. Al pressionar cap endavant els propulsors agafen velocitat i s'enlairen i al pressionar cap enrere es frenen i el dron baixa.
- **El comandament esquerre (en l'eix horitzontal):** aquest és el control de la inclinació lateral, que permet controlar en quina direcció apunta la cara del dron (es pot pensar en el dron com si fos un helicòpter o avió amb morro). Cap a la dreta, es mourà en direcció de les agulles del rellotge (mirant-ho des dalt) i cap a l'esquerra, a l'inrevés. En realitat, el que fa aquest control és donar més potència als propulsors que giren en una direcció i frenar els que giren cap a l'altre costat).
- **El comandament dret:** controla el moviment horitzontal, serveix per girar la direcció de vol del dron cap a la dreta o cap a l'esquerra. Si es pressiona cap endavant, s'inclina cap amunt la part posterior del vehicle. Però atenció, cal tenir en compte l'orientació del dron, perquè

aquest comandament funciona en relació a la direcció en que apunta el dron, no a la direcció en què es veu des d'on es controla.

3.5.11. Receptor de ràdio

És el dispositiu responsable de rebre la senyal de ràdio enviada des del comandament de control remot o emissora, el qual ha interpretat el moviment realitzat per l'usuari i l'ha transformat en una ona radial.

La senyal de ràdio és rebuda pel receptor de ràdio embarcat al multirotor i transformada en dades que s'envien a la controladora de vol perquè executi la instrucció, normalment això va acompanyat de canvis coordinats en la velocitat dels motors (quan es tracta d'una instrucció de moviment).

3.6. Selecció de components

En aquest apartat es descriuran els procediments generals més freqüents que cal seguir per tal de construir el millor multicòpter i també el que més s'adapti a les nostres necessitats. Per tal d'aconseguir-ho, caldrà donar resposta a les preguntes o dubtes que primer passen pel cap, com poden ser:

- Quin és el xassís més adequat per al meu VANT?
- Són adequats els motors i ESC per a l'estructura escollida?
- Quines hèlixs proporcionaran el millor rendiment?
- Quin tipus de bateria necessita?
- Quina emissora funcionarà millor?

A part d'aquestes incògnites bàsiques, durant el procés de construcció d'un VANT solen sorgir molts dubtes més i per aquest motiu s'exposarà el procediment a seguir per tal de seleccionar els components més adequats.

El primer que cal tenir en compte, és l'ús i el propòsit del multicòpter, és a dir, quina aplicació se li vol donar i per tant quina càrrega de pagament haurà d'aixecar. Un cop està clar, ja es pot avançar amb la selecció del xassís més adequat, hèlixs, motors, ESC, bateries i la controladora de vol, entre altres dispositius amb menys impacte en la presa de decisions.

3.6.1. Selecció payload

Tal i com s'ha explicat en la introducció, l'objectiu d'aquest projecte és construir un VANT capaç de realitzar funcions fotogramètriques de gran precisió i per aquest motiu és necessària una gran qualitat d'imatge i velocitat de dispar. La selecció de la càmera fotogràfica queda fora de l'abast del treball, però s'ha escollit la SONY α7 RII, ja que compleix amb les expectatives.



Figura 3.13 - Sony α7 RII (Font: [11]. www.ephotozine.com)

Pel que fa a la selecció del gimbal, s'ha optat per el model H7 de Gremsy, aquest és de 3 eixos, tot i que per al projecte de fotogrametria només es necessitava un de 2 eixos, es va optar per aquest model per tal de poder utilitzar-lo en altres aplicacions. Els motors i el controlador PID tenen una resposta molt ràpida, contrarestant les vibracions i oferint una gran estabilitat a la càmera.



Figura 3.14 - Gimbal Gremsy H7 (Font: [12]. www.gremsy.com)

3.6.2. Selecció del xassís

El xassís del VANT, és una de les parts més importants, i la primera que s'haurà d'elegir després de determinar l'aplicació que es vol realitzar. Cal tenir en compte que sigui adequat per tal de poder aixecar la càrrega de pagament (càmera i gimbal), tingui l'estructura desitjada, i finalment les dimensions, el pes i el material amb que està fabricat.

Tal i com s'ha indicat anteriorment, els multicòpter poden tenir moltes estructures diferents, i al mercat hi ha infinitat d'oferta en les diferents variants. En el cas de la fotogrametria és necessària una gran estabilitat, per aquest motiu es va optar per un octocòpter X8, que consta de quatre braços amb dos motors a cada braç disposats en forma coaxial.

Potser no és la millor solució, ja que la configuració coaxial ocasiona una lleugera pèrdua d'eficiència, però el model de Gryphon Dynamics és de gran resistència i ofereix la possibilitat de braços desmontables facilitant així el transport del vehicle, que considerant les dimensions que té, com podem observar a continuació, és un gran punt a tenir en compte.

Model	Dimensions (mm)						Pes (g)
	A	B	C	D	E	F	
XQ 1200 VZX	1200	848	884	155	508	592	1710

Taula 3.8 – Dimensions del VANT

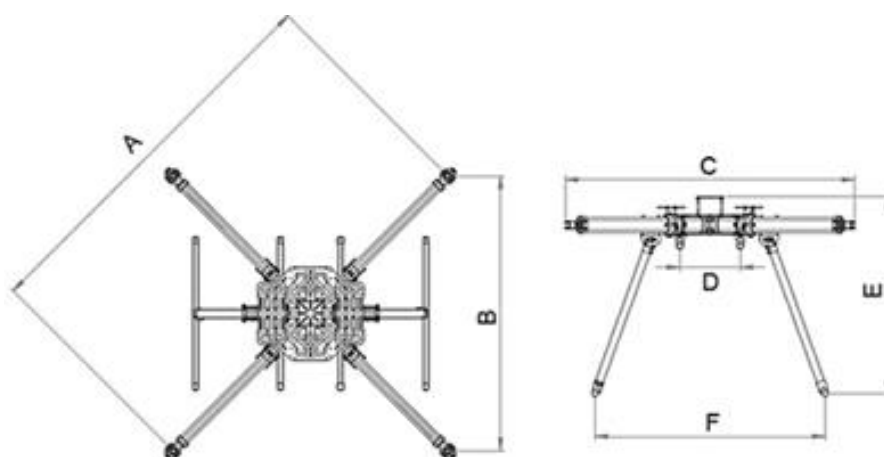


Figura 3.15 – Esquemàtic de dimensionat del xassís del dron (Font: [13]. www.gryphondynamics.com)



Figura 3.16 – Xassís Gryphon Dynamics X8 XQ-1200 VZX (Font: [13]. www.gryphondynamics.com)

3.6.3. Motors, hèlixs i ESC

Pel que fa a l'elecció dels motors, s'ha de tenir en compte que són els propulsors de l'aeronau, i que per tant han de tenir la suficient potència per tal d'enlairar-la.

El primer que cal fer, és obtenir un pes total aproximat del VANT complet. Això ho podem aconseguir mitjançant un estudi del mercat i de cada un dels components que formaran part del vehicle. Per aquest motiu s'ha elaborat la taula següent:

MASSA TEÒRICA VANT			
Component	Unitats	Massa unitària (g)	Massa total (g)
Xassís	1	1500	1500
Motors	8	250	2000
Hèlixs	8	40	320
Variadors	8	65	520
PDB	1	150	150
Bateria	2	2650	5300
Emissora	1	20	20
Tren aterratge	2	250	500
Payload (Gimbal + Càmera)	1	3300	3300
Controladora	1	50	50
MASSA TOTAL DRON			13660 g

Taula 3.9 – Aproximació de la massa total del VANT

Aquesta taula ens dona una massa aproximada del que serà el VANT que es vol construir, i a partir d'aquesta dada, ja es poden seleccionar uns motors adequats a aquestes característiques.

Després de dur a terme un estudi del mercat, s'han seleccionat els motors **U7-V2.0 KV490** del fabricant T-Motor, ja que compleixen amb les expectatives i és un fabricant reconegut per temes d'aeromodelisme.



Figura 3.17 – Motor del dron model T-MOTOR U7-V2.0 KV490 (Font: [14]. www.amazon.com)

Tal i com es pot observar en la imatge anterior, els motors ja incorporen els cables de connexió necessaris. Hi ha els dos d'alimentació (positiu i negatiu) i el dels servos, el qual anirà connectat als variadors o ESC.

A les següents taules, es poden observar les característiques tècniques d'aquests motors:

Test Report			
Test Item	U7 V2.0 KV490	Report NO.	U.00005
Specifications			
Internal Resistance	21mΩ	Configuration	12N14P
Shaft Diameter	6mm	Motor Dimensions	Φ60.7×39.5mm
AWG	16#	Cable Length	750mm
Weight Including Cables	299g	Weight Excluding Cables	258g
No. of Cells(Lipo)	3-8S	Idle Current@10v	1.1A
Max Continuous Power 180S	1300W	Max Continuous Current 180S	44A
Load Testing Data			
Ambient Temperature	/	Voltage	DC Power Supplier

Taula 3.10 – Característiques hardware dels motors U7-V2.0 KV490 (Font: [15]. www.tmotor.com)

Item No.	Voltage (V)	Prop	Throttle	Current (A)	Power (W)	Thrust (G)	RPM	Efficiency (G/W)	Operating Temperature (°C)
U7 V2.0 KV490	22.2	T-MOTOR 15*5CF	50%	9.3	206.46	1600	5300	7.75	46
			65%	18	399.60	2400	6600	6.01	
			75%	25.6	568.32	3060	7500	5.38	
			85%	33.3	739.26	3680	8100	4.98	
			100%	39.8	883.56	4100	8500	4.64	
		T-MOTOR 16*5.4CF	50%	10.3	228.66	1800	5100	7.87	48
			65%	19.5	432.90	2600	6200	6.01	
			75%	26.6	590.52	3220	6840	5.45	
			85%	35.2	781.44	3860	7420	4.94	
			100%	48.1	1067.82	4620	8000	4.33	

Taula 3.11 – Característiques tècniques dels motors U7-V2.0 KV490 (Font: [15]. www.tmotor.com)

Un dels factors més importants alhora d'escollir motors és el "thrust", ja que és la força d'empenyiment que fa cada un dels motors cap a dalt. I per tal d'obtenir la millor eficiència dels motors, cal que aquests amb un "throttle" del 50% sigui capaç d'aixecar el pes complet de l'aeronau. En el nostre cas, al ser un octocòpter, el càlcul és el següent:

$$Thrust_{Total} = n * Thrust_{i50} = 8 * 1800 = 14400g \quad (\text{Eq. 3.1})$$

n = nombre de motors del VANT

Per tant, el dron serà capaç d'aixecar 14,4 kg amb màxima eficiència. Cal comentar que s'han agafat els valors d'alimentació de 22,2V, ja que és el valor nominal normalment utilitzat per les bateries (més endavant es dona més detall sobre l'elecció de les bateries). A més, aquest valor ens defineix la dimensió de les hèlixs (16*5.4CF) (CF: Carbon Fiber) que haurà d'utilitzar el VANT, ja que amb unes de més petites no aconseguiria tant rendiment.

Figura 3.18 – Hèlixs model T-MOTOR Carbon Prop CF (Font: [15]. www.tmotor.com)

Pel que fa als variadors o ESC, és molt important tenir en compte també les recomanacions del fabricant dels motors, per aquest mateix motiu s'han seleccionat els FLAME 100A LV, ja que són els més compatibles i que per tant oferiran millors prestacions.



Figura 3.19 – Variadors model T-MOTOR FLAME 100A LV ESC (Font: [16]. www.aircraft_japan.com)

3.6.4. Bateries

L'elecció de les bateries, és un tema molt important, ja que al final són les que marquen l'autonomia en règim de vol de l'aparell. Tal i com s'ha comentat anteriorment, cal tenir en compte varis factors, però un dels més importants és l'energia que consumirà el dron i més concretament els motors, ja que al final són els que requereixen més.

A la taula de característiques del motor, podem observar que l'amperatge que necessiten els motors segons la potència entregada, no és precisament baix, i al ser 8 motors, es multiplica el consum.

Per aquest mateix motiu, s'ha optat per la utilització de dues bateries Tattu 22000mAh 22.2V 25C 6S1P Lipo, connectades en paral·lel.



Figura 3.20 – Bateries model Tattu 22000mAh 22.2V 25C 6S1P Lipo (Font: [17]. www.dronezone.com)

Aquesta solució, ens ofereix la possibilitat d'augmentar l'autonomia del vehicle fins a aconseguir els 12 minuts en règim de vol, el que implica doblar el temps que aconseguiríem amb només una bateria connectada.

Els càlculs realitzats han estat, si les dues bateries en paral·lel poden entregar 44,4 A durant 1 hora, i els motors tenen un consum de 27,94 A (valor mig segons els diferents throttle de la taula dels motors), tenint 8 motors consumiran 223,52A. Tenint en compte que els motors són la principal font de consum i que el valor obtingut està sobre dimensionat, fent la relació de consum respecte a energia entregada per les bateries (44,4 Ah / 27,94 A), surten unes 0,2 hores, el que equival a uns 12 minuts d'autonomia de vol.

Aquest valor és totalment orientatiu, i molt reduït respecte la realitat, ja que s'han agafat valors dels casos més desfavorables. Però també cal tenir en compte que les bateries no es poden arribar a descarregar totalment i que per tant si tenim en compte que les bateries no es descarregarien per sota del 20%, els 12 minuts ja es una dada més realista, i més en un dron d'aquestes dimensions i amb la carta de pagament que ha de suportar.

3.6.5. Controladora de vol

Pel que fa a l'elecció de la controladora de vol, és un tema delicat, ja que ha de ser un aparell molt fiable, i que no es pot permetre errades. Si no funciona correctament, el vehicle podria caure provocant danys importants.

Hi ha diferents controladores per les diferents aplicacions, però en definitiva es podrien classificar en 3 grups. En primer lloc, les més senzilles, que són per als aficionats principiants, que busquen fàcil integració i programació. En segon lloc les de fotografia aèria, que ofereixen diferents modes de vol, premiant l'estabilitat. I finalment les targetes controladores per a drons de carreres i vols acrobàtics.

Per al present projecte, ens centrarem amb les adequades per a fotografia aèria. Bàsicament les dues opcions més destacades són les controladores Naza del fabricant DJI, i els dos models de Mission Planner, que serien Pixhawk i APM.

En el cas de les de DJI, estan molt limitades per software, i no permeten tanta llibertat a l'hora de programar vols autònoms, per aquest motiu s'han descartat com a opció.

D'altra banda, la APM disposa d'una CPU de 8 bits enfront a la de 32 bits de la Pixhawk. Aquest fet fa que es puguin incorporar molts més modes de vol i una programació molt més complexa a la Pixhawk respecte a la APM. Com a contra de la Pixhawk, trobem que no és tan compacta com la APM, ja que s'hi ha d'incorporar un switch per activar el motors, un buzzer com a avisador acústic, i altres elements externs que es connecten als ports d'aquesta.

Finalment, s'arriba a la conclusió que la controladora que més s'adequava a les necessitats de l'aparell i la que millors prestacions, fiabilitat i llibertat de programació ofereix, és la Pixhawk 2.



Figura 3.21 -Controladora de vol Pixhawk 2 (Font: [18]. www.jdrones.com)

A la següent taula es poden observar algunes de les característiques més importants d'aquesta.

Controladora	Pixhawk 2
Microcontrolador	32-bit STM32F427 Cortex M4 core with FPU 32-bit STM32F103 failsafe co-processor
Freqüència	168 MHz
Memòria	256 RAM 2 MB Flash (fully accessible)
Interfaces	<ul style="list-style-type: none"> - 5 x UART (serial ports), one high-power capable, 2 x with HW flow control - 2 x CAN (one with internal 3,3 V transceiver, one on expansion connector) - Spectrum DSM / DSM2 / DSM-X® Satellite compatible input - Futaba S.BUS® compatible input and output - PPM sum signal input - RSSI (PWM or voltage) input - I2C - SPI - 3.3 and 6.6V ADC inputs

	- Internal micro USB port and external micro USB port extension
Sensors	On board: MPU9250 or ICM 20xxx (Gyro and Accelerometer) MS5611 (Barometer) Isolated vibration board: L3GD20 (Gyro) MPU9250 or ICM 20xxx (Gyro and Accelerometer) LSM303D (Accelerometer and magnetometer) MS5611 (Barometer)
GPS	Not incorporated
Nombre de ESC/Motors	8
Dimensions	95 x 45 x 31 mm
Pes	64 g
Complexitat d'ús	Medium

Taula 3.12 – Característiques controladora de vol Pixhawk 2

3.6.6. PDB (Power Distribution Board)

L'elecció de la PDB que més s'ajusti a les necessitats del dron del projecte en qüestió s'ha dut a terme de forma acurada. En primer lloc, s'ha tingut en compte els pics de corrent que pot suportar, ja que els motors tenen un consum elevat i si no és capaç d'entregar la suficient potència, perdriem eficiència. D'altra banda, cal tenir present l'adaptabilitat d'aquesta al xassís del vehicle, ja que és important que estigui ben integrada i sigui capaç d'alimentar a tots els dispositius embarcats.

Les necessitats bàsiques que ha de complir la PDB per aquest projecte, són bàsicament 3:

- Bona integració al xassís
- 8 sortides d'alimentació per als motors
- 2 BEC per alimentar la controladora i el sistema de transmissió de vídeo

Després de realitzar una recerca extensa del mercat actual, s'arriba a la conclusió que la que més s'adaptava a les necessitats exposades, era la PDB (600A) amb Dual BEC (GPD-3000DX) del fabricant Gryphon Dynamics, ja que compleix tots els requisits.



Figura 3.22 - PDB (600A) amb Dual BEC (GPD-3000DX) (Font: [13]. www.gryphondynamics.com)

3.6.7. Antena GPS i búixola

La selecció d'aquests dos elements, és important, ja que al final són els que donen la informació de la posició del dron en tot moment, és per això que cal que tinguin una gran precisió. També és bastant comú que la pròpia antena GPS incorpori la brúixola, i per tant amb un dispositiu tenim les dues funcions.

Tenint en compte les característiques esmenades, s'ha optat per la mini Ublox NEO-M8N GPS, ja que és molt lleugera (18g), té una precisió de 0.6m, treballa a gran velocitat alhora de cercar satèl·lits i la freqüència d'actualització és de 10GHz.



Figura 3.23 - Antena Mini Ublox NEO-M8N GPS (Font: [19]. www.hobbyKing.es)

3.6.8. Transmissor-receptor de telemetria

La selecció del transmissor i receptor de telemetria, no és un gran dilema, ja que hi ha varies opcions en el mercat i totes realitzen bé la seva funció al no ser molt complexa. El que cal tenir en compte és que l'ample de banda en el que treballen sigui de 433MHz i que sigui lleuger per a que suposi poc pes al embarcar-lo a l'aeronau. També cal tenir present que les antenes han de cobrir un ampli rang de distàncies per a no perdre la comunicació.

L'elecció per al present projecte ha estat la HKPilot Transceiver Telemetry Radio set V2, ja que és compatible amb la controladora Pixhawk i compleix amb les expectatives.



Figura 3.24 - Set Transmissor-Receptor telemetria V2 (Font: [19]. www.hobbyking.es)

Mitjançant el cable USB connectat al PC de terra, podem rebre les dades de vol a temps real tal i com s'ha indicat anteriorment en la descripció d'aquest dispositiu.

3.6.9. Emissora

La selecció de l'emissora queda fora de l'abast d'aquest projecte. S'ha utilitzat la Taranis X9D Plus, ja que era la que tenia l'empresa prèviament a l'elecció del projecte i ja cobria les necessitats d'aquest.

Consta de 16 canals per a configurar i treballa a l'ample de banda dels 2.4GHz.



Figura 3.25 - Taranis X9D Plus (Font: [19]. www.hobbyking.es)

Un avantatge d'aquest model és la fàcil configuració i la gran llibertat que ofereix, ja que és de software lliure per la qual cosa existeixen moltes llibreries preparades per a configurar-la al gust de l'usuari.

3.6.10. Receptor de ràdio

Pel que fa al receptor de ràdio, bàsicament només cal tenir en compte dues coses alhora de seleccionar el que més s'adeqüi a les necessitats del dron en qüestió. En primer lloc el nombre de canals que ofereix, ja que com més canals, més possibilitats de programació i més funcions es poden incorporar. I en segon lloc el rang de distàncies en que poden treballar les antenes.

Per els motius exposats, s'ha optat per la FrSky X8R, que consta de 16 canals i un rang de recepció de més de 1.5Km.



Figura 3.26 - FrSky X8R (Font: [20]. www.desertaircraft.com)

Com a al·licient, també cal tenir en compte que sigui un dispositiu lleuger, com és el cas (16.8 g), i que sigui compatible amb l'emissora que s'utilitzarà per a pilotar el vehicle.

3.6.11. Gravadora de àudio

Pel que fa la gravadora d'àudio, s'ha seleccionat la OLYMPUS VN-741PC, ja que és lleugera i ofereix una gran qualitat en la gravació de sons.



Figura 3.27 - Gravadora OLYMPUS VN-741PC (Font: [21]. www.olympus.es)

Les característiques tècniques d'aquesta gravadora es troben recollides en la següent taula:

Especificacions

Mitjà d'emmagatzematge

Interna / Targeta	Intern
Memòria interna	4 GB

Funció USB

Connexió USB directa	Sí
Velocitat USB	USB de alta velocitat

Pantalla

Visualització color	Blanca
Dimensió de pantalla	29 x 29 mm / 1,61"
Tipo Visualització	Visualització Full Dot Matrix (108 x 84 Píxels)
Ajustar mida de la font	Sí

Funcionament de l'aparell

Canviar HOLD	Sí
Interruptor ON	Sí

Modes de gravació

Formato de gravació	MP3
128 kbps	65 h
64 kbps	131 h (mono)
8 kbps	1.040 h (mono)
Temps de gravació màxim	1.040 h (MP3, 8kbps)

Modes Reproducció

Format reproducció	MP3
--------------------	-----

Freqüència de mostreig

MP3	44,1 kHz 8 - 128 kbps
-----	-----------------------

Freqüència de resposta

MP3	128 kbps / 40 - 17.000 Hz
	64 kbps / 40 - 15.000 Hz
	8 kbps / 40 - 3.500 Hz

Funció gravació

Gravació avançada	Filtre de Reducció del Soroll
-------------------	-------------------------------

Sortides del dispositiu

Diàmetre de l'altaveu	Altaveu dinàmic rodó integrat de ø20 mm
Sortida màxima	250 mW
Connector auriculars	Sí

Font d'alimentació

Font d'alimentació	Bateria: 2 x AAA
Duració de la pila alcalina	Gravació: 110 h (modo LP)

Entrada de les interfases

Sensibilitat / Guany del micròfon	Alta / Baixa / Auto Intel·ligent
Micròfons	Micròfon mono integrat

Dimensions

A x A x P	111,5 x 39 x 18 mm
Pes	77 g

Exterior

Color	Negre
Material	Plàstic

Requisits i Sistemes Operatius

Windows	Microsoft Windows Vista /7/8/8.1
Macintosh	Mac OS X 10.5 - 10.9

Taula 3.13 – Especificacions tècniques de la grabadora OLYMPUS VN-741PC (Font: [21]. www.olympus.es)

4. Estudi de gravació d'àudio

En aquest apartat del projecte, s'exposaran els diferents anàlisis i conclusions extretes de les senyals d'àudio gravades amb un dispositiu embarcat en tres VANTs de diferents característiques. En primera instància es farà una petita introducció a la l'acústica, destacant els aspectes més rellevants per al projecte i seguidament es presentaran els estudis realitzats.

4.1. Introducció a l'acústica

L'acústica és la ciència que estudia tots els aspectes relacionats amb el so, com poden ser els fenòmens de generació, propagació y recepció de les ones sonores en diferents medis i situacions.

Aquesta, està regida per molts fonaments físics, ja que en definitiva es tracta d'ones desplaçant-se en un entorn, que en el cas d'aquest estudi és l'aire. Aquestes ones es generen per la interacció entre l'elasticitat (compressibilitat) y la inèrcia (2na llei de Newton).

Per tal de poder aprofundir més en el món de l'àudio, a continuació es descriuen alguns dels aspectes més rellevants, com poden ser:

Nivell de pressió sonora (en anglès SPL = Sound pressure level): és el nivell de so que s'ha registrat amb un aparell de mesura del nivell sonor. És a dir, la intensitat del so que arriba a un punt en un moment donat. Aquesta es mesura amb decibels (dB), i varia entre 0 dB (Umbral d'audició) i 120 dB (Umbral de dolor). El nivell de pressió sonora es determina mitjançant la formula:

$$L_p(dB) = 20 \log \frac{P_{ef}}{P_{ref}} \quad (\text{Eq 4.1})$$

P_{ef} : Pressió sonora en N/m^2 o Pascals

P_{ref} : Pressió de referència $2 \times 10^{-5} N/m^2$ o Pascals

L'ús de l'escala logarítmica en decibels, es deu a que la resposta de l'oïda a la intensitat sonora és logarítmica.

El valor de P_{ref} s'ha escollit perquè coincideix amb l'ombrall d'audició normal per a 1 kHz, el que implica que un so de 1 kHz es pot percebre, de mitjana, quan $L_p > 0$ dB. A la taula següent es poden observar alguns valors típics de la pressió eficaç sonora en dB a diferents freqüències dels sons més habituals.

Font Sonora	P_{ef} (Pa)	L_p (dB)
Umbral de dolor	20	120
Discoteca amb volum elevat	6.3	110
Ambient industrial sorollós	0.63	90
Piano a 1m de distancia	0.2	80
Conversació normal	0.02	60
Habitació interior (dia)	0.002	40
Habitació interior (nit)	0.00063	30
Estudi de gravació	0.0002	20
Umbral d'audició a 1kHz	0.00002	0

Taula 4.1 – Nivells de pressió eficaç i sonora en fonts de so típiques (Font: [22]. www.fadu.edu.uy)

Potència sonora (W) o acústica (en anglès PWL = Power Wattage Level): és la quantitat d'energia per unitat de temps emesa per una font determinada en forma d'ones sonores. Aquesta ve determinada per una longitud d'ona, la qual és inversament proporcional a la potència. Una longitud d'ona menor, provoca un augment de la freqüència amb el conseqüent augment de l'energia emesa. És important d'estacar, que aquest valor és intrínsec de la font i que per tan no varia segons el medi on es trobi. La unitat de mesura és el Watt (W).

Nivell d'intensitat sonora (I): és el valor que representa la quantitat d'energia acústica (Potència) per unitat de temps transmesa per una ona sonora, respecte a unitat d'àrea perpendicular a la direcció de propagació.

Es calcula amb la formula següent:

$$I = \frac{W}{A} \quad (\text{Eq 4.2})$$

On W , és la potència acústica i A , la superfície. El resultat s'expressa amb les unitats W/m^2 . Aquesta intensitat disminueix al allunyar-se de la font sonora amb una relació de la inversa del quadrat de la distància ($1/r^2$), i com en una ona, l'energia és proporcional al quadrat de l'amplitud i al quadrat de la seva freqüència, al dependre d'ella, la intensitat sonora també ho serà.

A part, la intensitat sonora també depèn de la naturalesa del medi en que es propaga. Com menys elàstic sigui el medi, menor serà el valor de la intensitat.

Com l'oïda humana és capaç de percebre un rang molt ampli, des de l'ombrall d'audició fins a l'ombrall de dolor, resulta molest treballar amb nombres de xifres tan grans i per això s'utilitza una escala logarítmica, en la que s'utilitza com a nivell de referència l'ombrall d'audició (10^{-12} W/m^2).

Nivell de potència acústica (L_w): és el paràmetre que mesura la forma com es percebuda la potència sonora, és a dir el volum. Les persones no perceben de forma lineal el canvi de la potència segons si s'apropen o s'allunyen de la font. La sensació de percepció és proporcional al logaritme de la potència. Aquesta s'expressa en decibels (dB) igual que la pressió, i es calcula amb la següent formula:

$$L_w(\text{dB}) = 10 \log \frac{W}{10^{-12}} \quad (\text{Eq 4.3})$$

W: Potència acústica

4.2. Fonts sonores

El so, es pot definir com a vibracions mecàniques que es propaguen per un medi elàstic i dens. Aquest medi acostuma a ser l'aire; però també ho poden fer en altres medis, ja siguin sòlids, líquids o gasosos (el so no es propaga en el buit).

Així doncs, es coneix com a font sonora, aquella de la qual procedeixen les vibracions i per tant l'emissora d'aquestes ones que provoquen una sensació auditiva a través de canvis de pressió.

Depenent de si la font està fixa o en moviment, de la distància a la que es troba del receptor, del recinte o medi on es troba i molts altres factors, es produeixen una sèrie d'efectes en la percepció del so que captem.

Un exemple clar en seria l'efecte Doppler, que és el canvi de freqüència aparent, produït per el moviment relatiu de la font respecte a l'observador. Això implica que el so emès per la font quan s'acosta a l'observador és més agut que quan s'allunya. O el que és el mateix, la freqüència augmenta quan observador i font s'apropen i es redueix quan s'allunyen.

La relació entre la freqüència observada f i la freqüència emesa f_0 ve donada per la següent equació:

$$f = \left(\frac{c + v_r}{c + v_s} \right) f_0 \quad (\text{Eq 4.4})$$

c: velocitat de propagació de les ones en el medi

v_r : velocitat del receptor en relació amb el medi (positiva si s'acosta a l'emissor)

v_s : Velocitat de la font respecte al medi (positiva si s'allunya del receptor)

4.2.1. Tipus de fonts sonores

Segons la forma en que la font sonora emet les vibracions mecàniques que formen el so, les fonts es poden classificar en tres tipus:

Fonts puntuals

Són totes aquelles que emeten un so de forma contínua i de manera uniforme en totes les direccions. És a dir, que radien l'energia sonora de forma esfèrica. Aquest fet, fa que la intensitat acústica amb la que emeten el so, disminueixi a una velocitat bastant elevada segons ens allunyem de la font. Cada cop que doblem la distància respecte a la font, la intensitat es redueix en 6 dB.

Per a calcular la intensitat acústica d'aquest tipus de fonts s'utilitza la següent formula:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad \text{(Eq 4.5)}$$

I: Intensitat acústica

W: Potència acústica

r: distància emissor-receptor

Fonts lineals

Les fonts lineals, són aquelles que emeten el so de forma contínua al llarg d'una línia imaginària denominada eix. També es considera font lineal un conjunt de fonts en grup que estan separades per una distància molt reduïda, com podria ser una columna d'altaveus.

A diferència de les fonts puntuals, les lineals radien l'energia sonora de forma cilíndrica, pel que la intensitat acústica disminueix a menor velocitat segons ens anem allunyant de la font. Més concretament, cada cop que es dobla la distància respecte a l'emissor, la intensitat disminueix en uns 3 decibels.

Per a calcular la intensitat acústica d'aquest tipus de fonts s'utilitza la següent formula:

$$I = \frac{W}{2\pi r} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (\text{Eq 4.6})$$

I: Intensitat acústica

W: Potència acústica

r: distància emissor-receptor

Fonts planes

Una font plana és aquella que radia el so en una única direcció. Un exemple podria ser un pistó polsant dins d'un recinte tancat, com un tub. Emet l'energia en una sola direcció i la distribueix en fronts d'ones plans. Aquest tipus d'ones són més senzilles.

Les superfícies que contenen els punts tenen els mateixos valors d'amplitud i són plans perpendiculars a la direcció de propagació.

La intensitat d'aquest tipus de fonts ve donada per la següent equació:

$$I = \frac{P^2}{\rho_0 c_0} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (\text{Eq 4.7})$$

P: Pressió

ρ : densitat volumètrica del medi

4.2.2. Propagació del so en espais oberts

Quan considerem la propagació del so en espais oberts, el nivell de la intensitat sonora (L) en un punt es veu influenciat per una sèrie de factors depenent del medi de propagació.

Molts d'aquests factors (meteorològics, topogràfics, etc.) presenten variabilitat en el temps, dificultant, a la pràctica, la determinació precisa del nivell sonor.

Atenuació per medi (aire)

La disminució del nivell sonor ocasionada per l'aire, varia d'acord amb la temperatura i la humitat d'aquest. Aquesta atenuació, resulta significativa en freqüències altes i en distàncies majors a 300m, que no és el cas d'aquest estudi. De totes formes, al gràfic següent es pot observar aquest efecte:

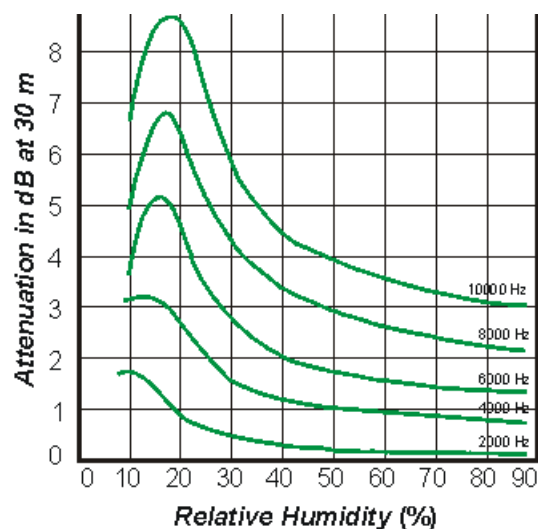


Figura 4.1 - Gràfica comportament atenuació amb la humitat de l'aire

Atenuació per vent

L'increment de la velocitat del vent a mesura que augmenta l'alçada, provoca que el fenomen de propagació no resulti simètric respecte a la font, donant lloc a desviacions de les ones acústiques i generant zones d'ombra i reforçament acústic, tal i com es pot apreciar a la següent il·lustració:

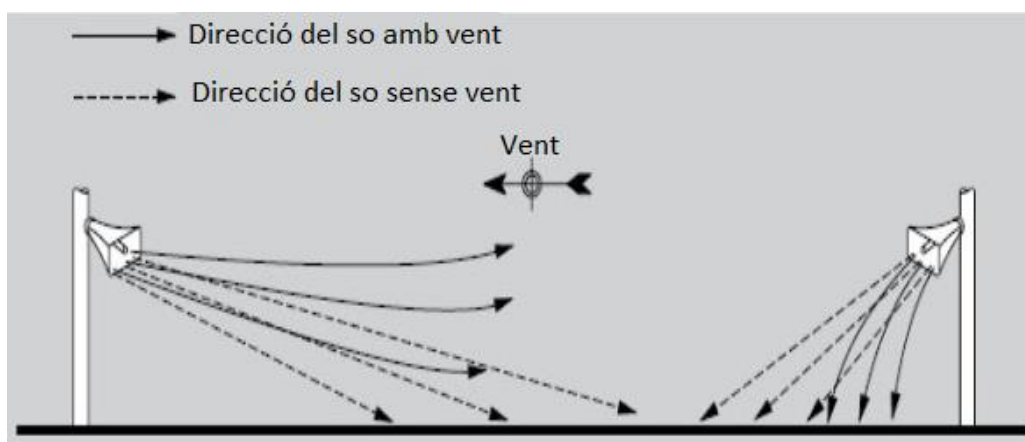


Figura 4.2 - Comportament atenuació amb el vent

La gran variabilitat de direcció i velocitat del vent, fa molt difícil avaluar la seva influència a la pràctica.

Atenuació per tipus de sòl

L'atenuació que ofereix la vegetació no resulta significativa fins a extensions de 100-200 m i depèn principalment de l'altura i la homogeneïtat.

Al igual que en el cas de l'atenuació per aire, són les freqüències altes les que es veuen majoritàriament afectades per la presència de vegetació, per aquest motiu no afecta en l'àmbit d'aquest projecte, però són factors que cal tenir igualment presents.

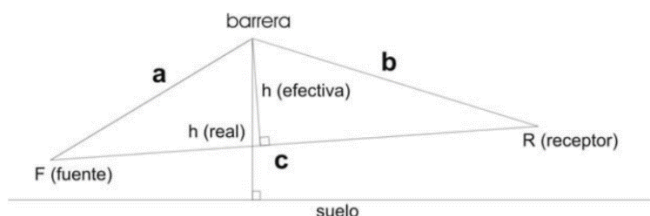
A la taula següent taula es poden observar alguns dels valors d'atenuació en dB/100 m:

Tipus d vegetació	Freqüència (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Herba escassa (0.1 a 2.0 m)	0.5	-	-	3	-	-
Herba espessa (0.4 a 0.5 m)	0.5	-	-	12	-	-
Arbres de fulla perenne	7	11	14	17	19	20
Arbres de fulla caduca	2	4	6	9	12	16

Taula 4.2 – Nivells de pressió sonora en fonts de so típiques (Font: [22]. fadu.edu.ey)

Atenuació per barrera (estudi de Maekawa)

Per a calcular l'atenuació per efecte de barrera, cal mirar a la següent taula amb la diferència ($a + b - c$) (m) d'acord amb el següent gràfic, obtenint així l'atenuació en dB corresponent a les diferents freqüències:



$a+b-c$ (m)	Ruido de Tránsito <i>L10 Global</i>	frecuencias centrales de banda de octavas (hz)								
		32	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
0,03	8,5	5	5,5	6	7	8	9	10	12	14,5
0,06	10	5,5	6	7	8	9	10	12	14,5	17,5
0,12	11,5	6	7	8	9	10	12	14,5	17,5	21
0,24	13,5	7	8	9	10	12	14,5	17,5	21	23,5
0,5	16	8	9	10	12	14,5	17,5	21	23,5	24
1	18,5	9	10	12	14,5	17,5	21	23,5	24	24
2	23	10	12	14,5	17,5	21	23,5	24	24	24
4	24	12	14,5	17,5	21	23,5	24	24	24	24
8	24	14,5	17,5	21	23,5	24	24	24	24	24

Estudio de Maekawa, según Número de Fresnel
 $a+b-c$ es la diferencia de recorrido entre la trayectoria por encima de la barrera y el camino directo.

Taula 4.3 – Valors descriptius de l'estudi de Maekawa (Font: [22]. fadu.edu.uy)

A continuació es poden trobar unes taules on es recullen valors típics de pressió sonora:

Niveles de Presión Sonora (dB)									dB(A)
	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz	Global
Exterior									
Pájaros a 3 m						50	52	54	57
Grillo					35	51	54	48	57
Perro grande a 15 m (ladrando)		50	58	68	70	64	52	48	72
Cortadora de pasto a 1,5 m	85	87	86	84	81	74	70	72	86
Disparo de pistola a 75 m (niveles pico)				83	91	99	102	106	106
Oleaje de 3 a 5 m (mar moderado)	71	72	70	71	67	64	58	54	78
Viento entre arbolado (15 km/h)				33	35	37	37	35	43
Transportes									
Camión grande a 15 m (90 km/h)	83	85	83	85	81	76	72	65	86
Automóvil de pasajeros a 15 m (90 km/h)	72	70	67	66	67	66	M	54	71
Motocicleta a 15 m (a toda marcha)	95	95	91	91	91	87	87	85	95
Tren a 30 m (a toda marcha)	95	102	91	90	86	87	83	79	94
Sirena de tren a 50 pies	88	90	110	110	107	100	91	78	109
Bocina da auto a 5 m				92	85	90	80	60	97
Avión comercial pequeño a 150 m (despegue)	77	82	82	78	70	56			79
Helicóptero mediano a 150 m (monomotor)	92	89	83	81	76	72	62	51	80

Niveles de Presión Sonora (dB)									dB(A)
	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz	Global
Interior									
Alarma de reloj a 1-2 m (sonando)		46	48	55	62	62	70	80	80
Afeitadora eléctrica a 50 cm	59	58	49	62	60	64	60	59	68
Aspiradora a 1 m	48	66	69	73	79	73	73	72	81
Deposito de basura a 1 m	64	83	69	56	55	50	50	49	69
Lavarropa automático (ciclo de lavado)	59	65	59	59	58	54	50	46	62
Toilet (cargando el tanque)	50	55	53	54	57	56	57	52	63
Lavarropa semi-automático (ciclo de carga)	68	65	68	69	71	71	68	65	74
Unidad de aire acondicionado	64	64	65	56	53	48	44	37	59
Teléfono a 1-2 m (sonando)		41	44	H	68	73	69	93	83
TV a 3 m	49	62	64	67	70	68	63	39	74
Stereo (nivel de escucha personas adolescentes)	60	72	83	82	82	80	75	60	86
Stereo (nivel de escucha personas adultas)	56	66	75	72	70	66	64	48	75
Violin a 1,5 m (fortissimo)			91	91	87	83	79	66	92
Conversación normal a 1 m		57	62	63	57	49	40		63
Amplificación en concierto de rock	116	117	119	116	118	115	109	102	121
Salón para audiovisuales	85	89	92	90	89	87	85	80	94
Aplauso en auditorio	60	68	75	79	85	84	75	65	88
Salón de clase	60	66	72	77	74	68	60	50	78
Centro de atención telefónica a clientes	78	75	73	78	80	78	74	70	84
Jauría			90	104	106	101	89	79	108
Gimnasio	72	78	64	89	86	80	72	64	90
Cocina	86	85	79	78	77	72	65	57	81
Laboratorio en centro educativo	65	70	73	75	72	69	65	61	77
Biblioteca pública	60	63	66	67	64	58	50	40	68
Sala de máquinas (edificio de vivienda)	87	66	es	84	83	82	80	78	88
Sala de práctica musical	90	94	96	96	96	91	91	90	100
Cancha de Padel	82	85	80	85	83	75	68	62	86
Àrea de recepció de hotel	60	66	72	77	74	68	60	50	78
Teleconferència	65	74	78	80	79	73	68	60	83

Taula 4.4 – Nivells de pressió sonora en fonts típiques (Font: [22]. fadu.edu.uy)

4.2.3. Estudi dels micròfons

El patró polar d'un micròfon és la seva sensibilitat al so en relació a la direcció o l'angle del qual procedeix el so, o dit d'una altra manera, la qualitat amb la qual el micròfon "escolta" el so procedent de diferents direccions.

Els tipus de micròfons més habituals de direccionalitat són:

Cardioide:

Tenen la màxima sensibilitat en la seva part frontal i la mínima a la del darrere. Això li ofereix un total aïllament contra el so d'ambient no desitjat i fa que sigui molt més resistent a la realimentació que els micròfons omnidireccionals. Tot això fa que els micròfons cardioïdes resultin particularment adequats per a escenaris amb molt de soroll.

Supercardioide:

Ofereixen un patró de captura més estret que els cardioïdes i tenen un gran nivell de rebuig del soroll d'ambient. Però també capten alguna cosa del senyal procedent directament de darrere d'ells. Per aquest motiu és molt important en aquest cas col·locar correctament els monitors.

Els micròfons supercardioïdes són més adequats a l'hora de captar fonts sonores individuals en entorns amb molt soroll. Són els més resistents als problemes de realimentació.

Omnidireccionals:

El micròfon omnidireccional té una sortida o sensibilitat igual en tots els angles, el que implica que és capaç de captar sons procedents de totes les direccions. Per aquest motiu, aquest tipus de micròfons no han de ser orientats cap a una direcció concreta, el que resulta especialment útil amb micròfons de tipus "lavalier" o "de solapa". Un desavantatge d'aquests micròfons és que no pot allunyar-nos de fonts no desitjades com altaveus de PA (Públic Adress) que poden donar lloc a problemes de realimentació.

Bidireccional:

Un micròfon amb un patró polar en forma de vuit capta el so procedent de davant i de darrere, però no el dels laterals (angle de 90°). Els micròfons amb patrons en forma de vuit són, en general, micròfons de cinta o de gran diafragma.

La figura següent mostra en format gràfic els diagrames de directivitat:

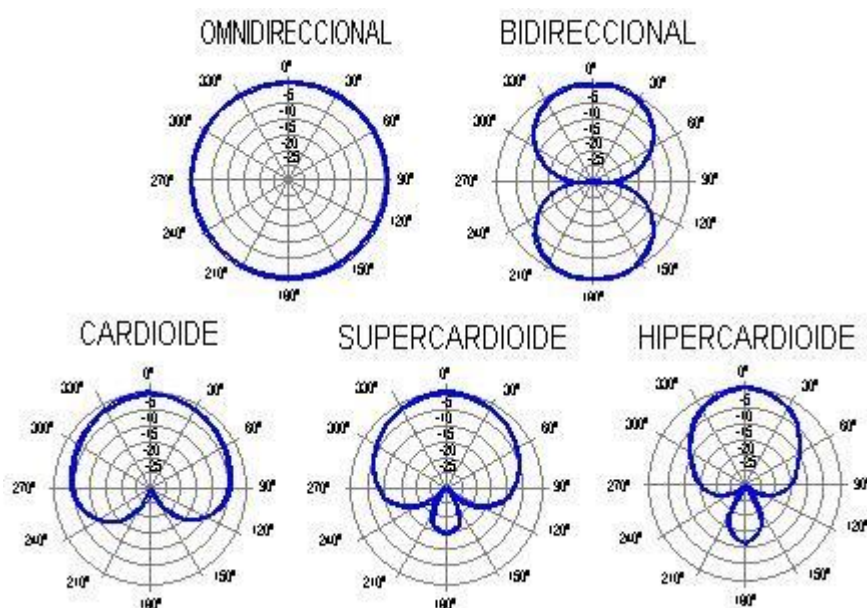


Figura 4.3 - Diagrames de directivitat dels micròfons (Font: [23]. www.centroauditivo-valencia.es)

Tots els micròfons direccionals (és a dir, cardioides, supercardioides, ...) estan subjectes a l'anomenat efecte de proximitat. Aquest efecte es produeix quan el micròfon és col·locat massa a prop de la font de so i es produeix un augment de la resposta en greus i, com a conseqüència d'això, un so més càlid però també més opac. Els cantants professionals de vegades treballen amb aquest efecte. Per experimentar amb això, només cal acostar el micròfon als llavis mentre es canta i s'observarà com canvia el so.

En el cas de l'estudi realitzat, el micròfon utilitzat ha estat el que porta integrat la gravadora Olympus descrita anteriorment, i es tracta d'un de tipus cardioide.

4.3. Descripció de l'estudi de camp

L'objectiu d'un estudi de camp és recollir el màxim de dades possible per tal de, posteriorment, poder dur a terme un bon anàlisi d'aquestes. Cal tenir en compte que s'ha de recrear l'escenari més realista possible i que per tant tindrà uns resultats més versemblants.

Per al projecte en qüestió s'han realitzat jornades a camp, consistents en una sèrie de vols amb 3 drons diferents als quals s'hi embarcava una gravadora d'àudio.



Figura 4.4 - VANTs utilitzats per l'estudi de camp (s1000, DM i DP d'esquerra a dreta)

Es realitzaven els vols a diferents altures, més concretament a les altures de 5, 10 i 20 m d'elevació respecte al nivell del sòl. A terra es situava una font amplificadora d'àudio (minicadena), amb la qual s'emetien sons a diferents freqüències començant per 500 Hz i acabant als 4000 Hz amb increments de 500 Hz. Els sons es creaven amb un generador d'ones aconseguint així les diferents freqüències desitjades.



Figura 4.5 - Foto de la jornada de treball de camp

4.4. Caracterització del so de la font sonora

En aquest apartat es durà a terme un estudi experimental mitjançant la gravació del so de la font sonora en diferents graus de volum per tal d'obtenir una funció d'aproximació dels decibels que representen a les gràfiques extretes de les gravacions a camp.

Per tal de realitzar aquest estudi el procediment ha estat el següent:

1. Realitzar una sèrie de gravacions d'àudio amb la font sonora emetent el so amb una freqüència constant de 3000 Hz introduïda amb el generador de funcions.
2. Anar pujant el volum de l'aparell gradualment per tal d'aconseguir el màxim de dades possible.
3. Al mateix temps que es duen a terme les gravacions, mitjançant un sonòmetre, es van apuntant els decibels mesurats per a cada volum de la font de so.
4. Un cop es tenen totes les gravacions, amb MatLab, extraiem les gràfiques als diferents volums i alhora obtenim el màxim absolut en l'eix y (el qual representa l'amplitud en les gràfiques).
5. Finalment, ja tenim les dades necessàries per a formar la gràfica definitiva de caracterització (decibels - amplitud) i obtenir la funció d'aproximació.

Les gràfiques extretes per als diferents volums de la font sonora es poden observar a continuació:

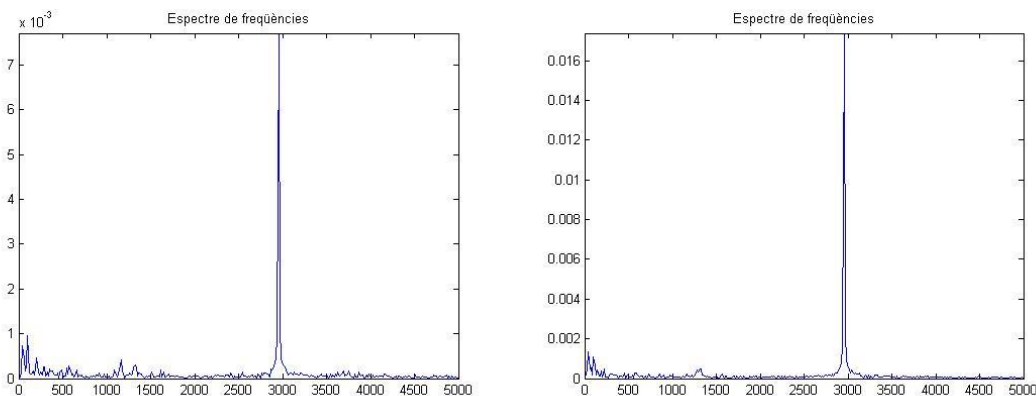


Figura 4.6 – Espectre obtingut al emetre sons de 3000 Hz a volum 1 (figura de l'esquerra) i 2 (figura de la dreta) amb la minicadena

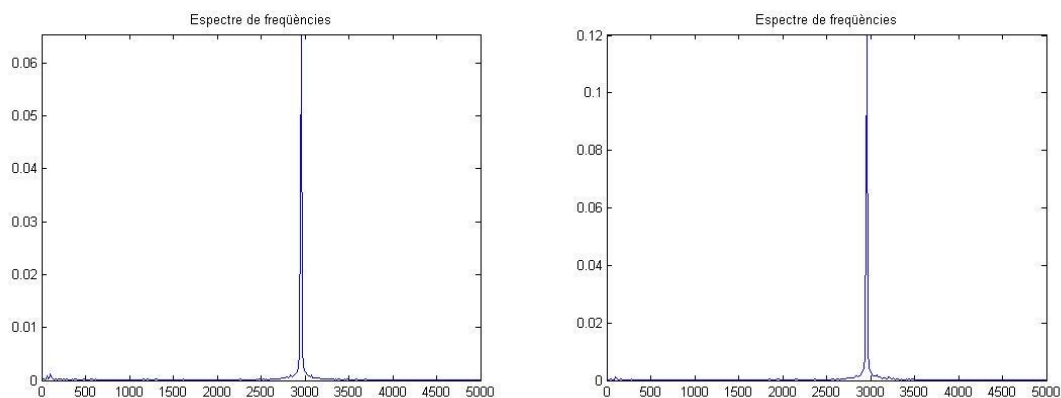


Figura 4.7 - Espectre obtingut al emetre sons de 3000 Hz a volum 3 (figura de l'esquerra) i 4 (figura de la dreta) amb la minicadena

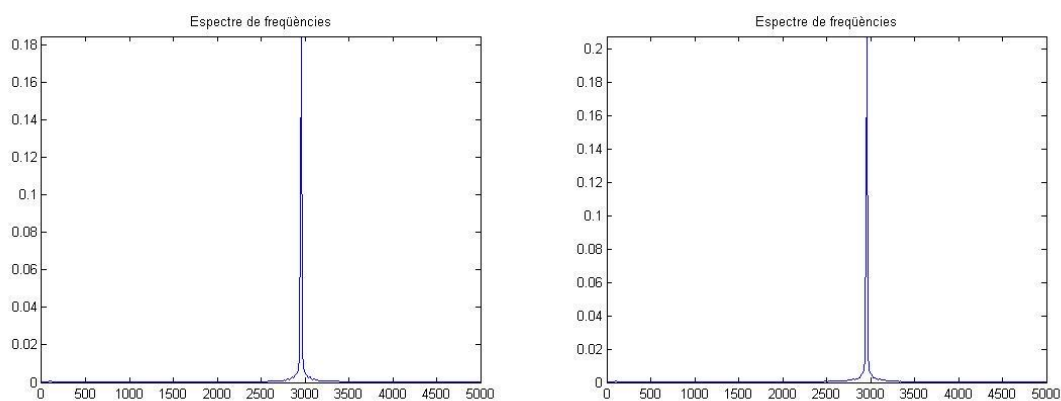


Figura 4.8 - Espectre obtingut al emetre sons de 3000 Hz a volum 5 (figura de l'esquerra) i 6 (figura de la dreta) amb la minicadena

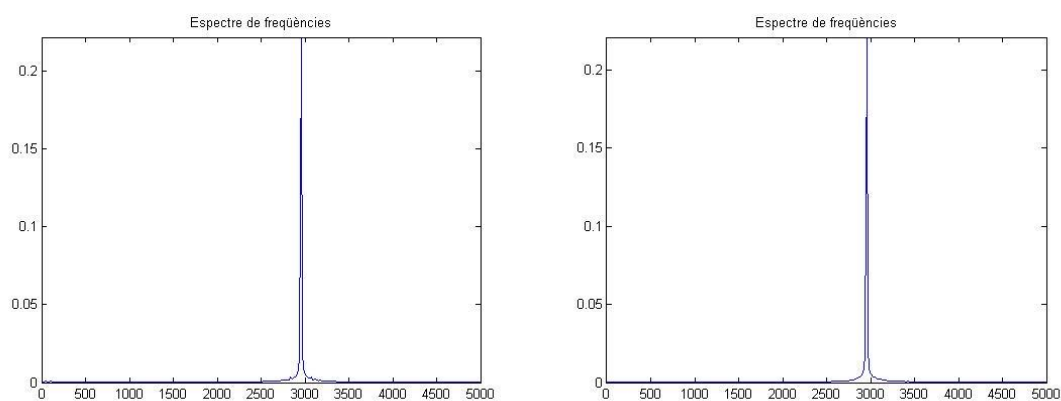


Figura 4.9 - Espectre obtingut al emetre sons de 3000 Hz a volum 7 (figura de l'esquerra) i 8 (figura de la dreta) amb la minicadena

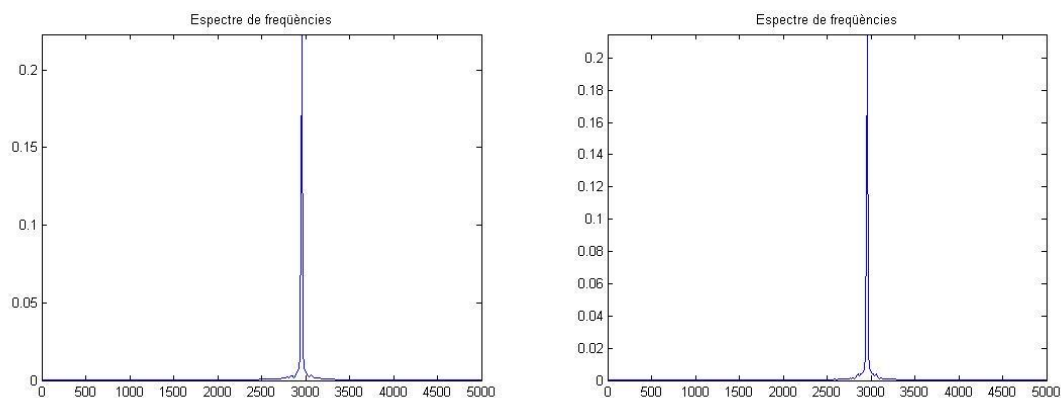


Figura 4.10 - Espectre obtingut al emetre sons de 3000 Hz a volum 9 (figura de l'esquerra) i 10 (figura de la dreta) amb la minicadena

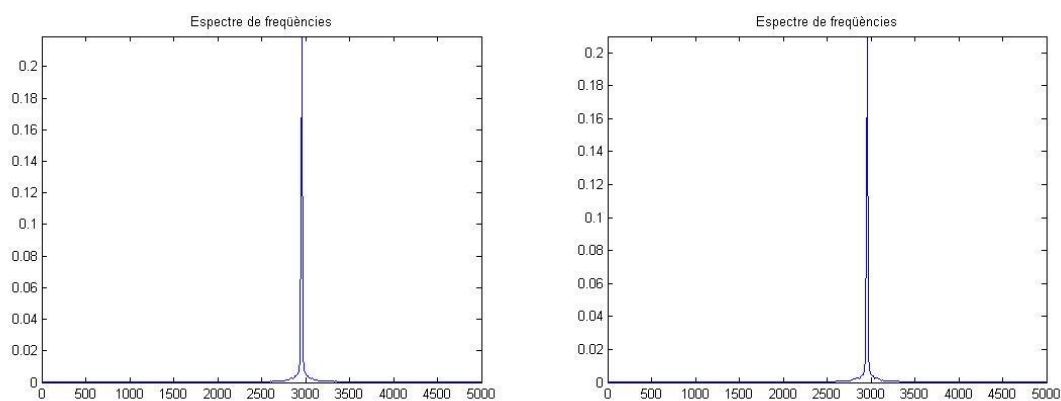


Figura 4.11 - Espectre obtingut al emetre sons de 3000 Hz a volum 11 (figura de l'esquerra) i 12 (figura de la dreta) amb la minicadena

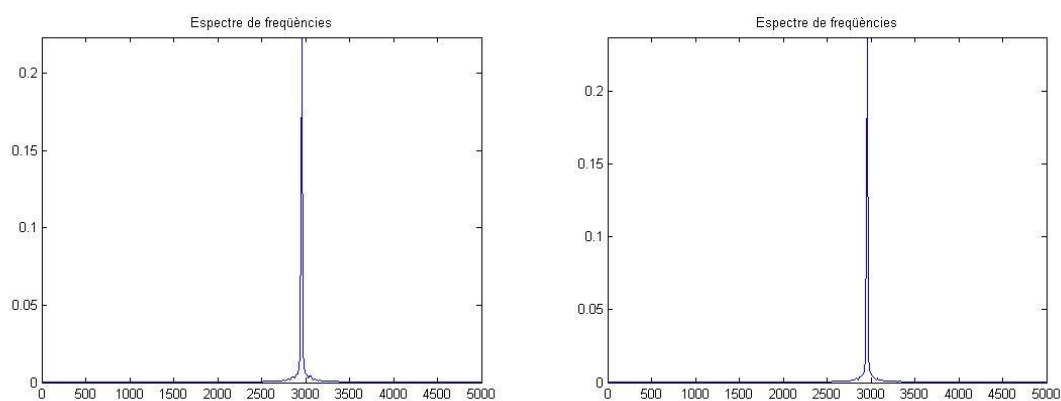


Figura 4.12 - Espectre obtingut al emetre sons de 3000 Hz a volum 13 (figura de l'esquerra) i 14 (figura de la dreta) amb la minicadena

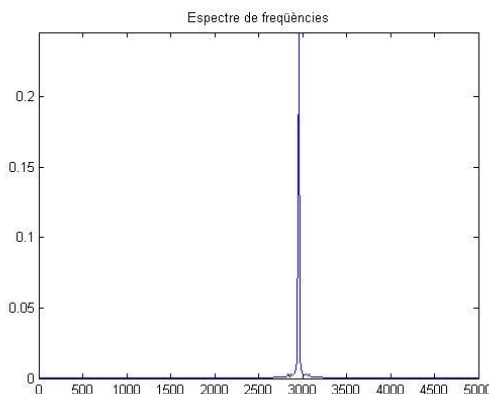


Figura 4.13 - Espectre obtingut al emetre sons de 3000 Hz a volum 15

Es pot observar que al principi hi ha una forta pujada en l'amplitud, però al final es va estabilitzant. D'aquesta forma en podem extreure la conclusió que té una resposta exponencial.

També cal mencionar, que com tota prova experimental, no és perfecta, i per això podem apreciar que en algunes de les gravacions tot i que el volum de la minicadena és més elevat, la seva gràfica mostra una amplitud menor. Això pot ser degut a que l'aplicació usada com a sonòmetre té un marge d'error del 2%, i els petits sons ambientals presents en el moment de la gravació també poden causar una petita distorsió en el resultat.

Així doncs, les dades extretes de les gràfiques i del sonòmetre es representen a la taula que es mostra a continuació:

Volum minicadena	Decibels (dB)	Amplitud
1	31	0,0077
2	35	0,0174
3	48	0,0654
4	59	0,1204
5	63	0,1846
6	66	0,2079
7	70	0,2217
8	72	0,2207
9	74	0,2228
10	77	0,2147
11	79	0,2191
12	82	0,2098
13	84	0,2233
14	87	0,2371
87	87	0,2475

Taula 4.5 – Valors obtinguts de decibels – amplitud pels diferents volums de la minicadena

Amb els valors representats a la taula anterior, mitjançant l'eina MatLab, s'ha realitzat una representació gràfica i també s'ha extret la funció d'aproximació que més s'adequa als punts presos.

A la següent figura es pot observar la gràfica obtinguda:

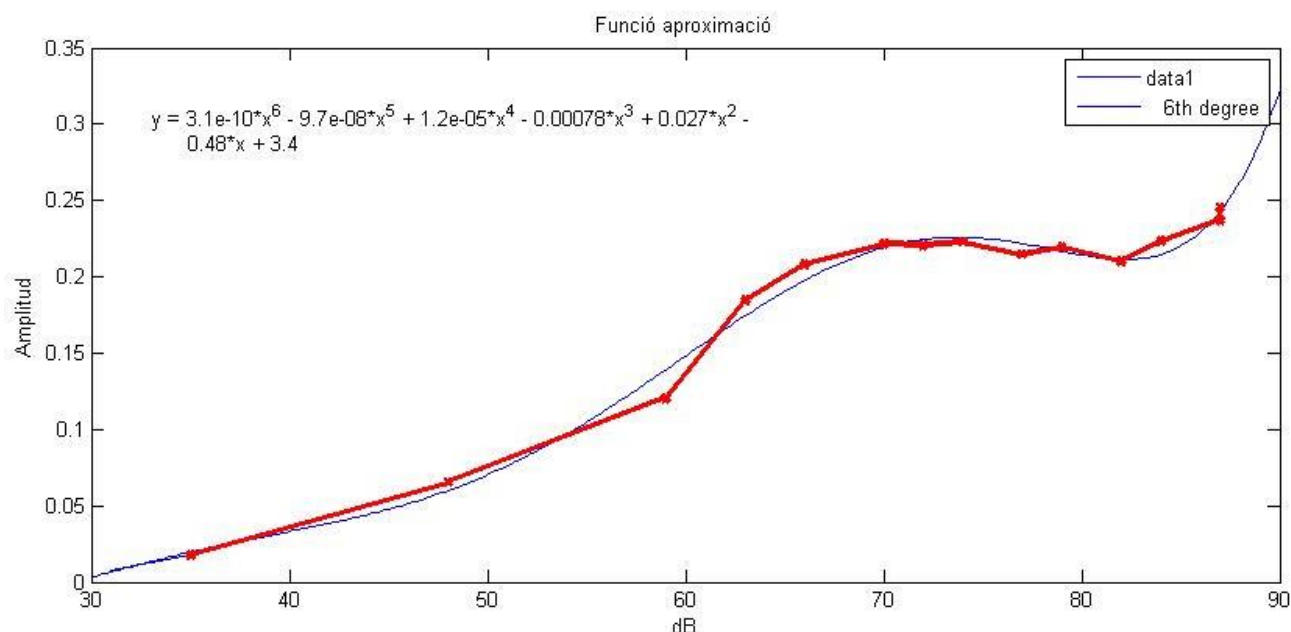


Figura 4.14 – Gràfica extreta de les dades obtingudes amb el sonòmetre i les gràfiques de MatLab (Decibels – Amplitud)

En color vermell tenim la regressió lineal dels punts obtinguts segons la taula, i en color blau, la resposta de la funció d'aproximació. En aquest cas, després d'observar les diferents funcions d'aproximació, la que més s'aproximava a la realitat era la del polinomi de 6è grau. Podem observar l'equació que caracteritza aquesta funció en la pròpia gràfica (extrem superior esquerra).

Cal tenir en compte, que l'aproximació deixaria de ser bona a partir dels 87 dB, ja que en el cas de les gravacions, en volums superiors a 15, la resposta es quedava estàtica, entenent així, que arribava a saturar. Per el contrari, la funció d'aproximació seguiria augmentant l'amplitud a mesura que augmentessin els decibels.

Gràcies a aquest estudi es podran categoritzar les respostes obtingudes amb les gravacions amb el dron i adquirir un rang de decibels que són capaços de ser captats des de l'aeronau depenent la distància a la que es trobi de la font sonora.

4.5. Anàlisi d'espectre de freqüències

En aquest apartat es presentarà com s'ha dut a terme l'anàlisi de l'espectre de freqüències i les primeres conclusions que es deriven de l'estudi.

4.5.1. Estudi amb MATLAB

Per tal de poder fer un estudi acurat dels àudios gravats amb els drons a camp, s'ha utilitzat el Software MATLAB, el qual ens permet llegir l'arxiu en format WAV i transformar-lo en una ona sobre una base de temps, per tal de posteriorment poder extreure les gràfiques corresponents a l'espectre de freqüències mitjançant la transformada de Fourier.

El codi utilitzat ha estat el següent:

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% ESPECTRE DE LES SENYALS D'ÀUDIO %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%% LECTURA DE L'ARXIU D'ÀUDIO %%%%%%%%%
%%%%%%%% FRECUENCIA DE MOSTREIG 44100 HZ %%%%

y=wavread('s1000_20m_4000Hz',1,3000));

x = size (y);
long = x (1);
z = zeros(long,1);

for f1 = 1 : long
    z(f1,1) = y(f1,1);
    f1;
end

t=10e6/44100+(0 : long-1)/44100; % Càlcul de t real a partir de f de mostreig
figure (1)
plot (t , z)
title ('Senyal audio-temps')
pause

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ESPECTRE DE LA SENYAL %%%%%%%%%
a=fft(z); %Fem la transformada de Fourier
N= long;
a=a/N; %N és el nombre de mostres
[X2, w]=freqz(z,1,N,'whole');
hz=44100*w/(2*pi);
figure (3)
plot (hz , abs(a));
```

```
axis([0,5000,0,max(abs(a))])
title ('Espectre de freqüències');
pause
close all
```

Els resultats obtinguts per les diferents gravacions d'àudio, es mostren als següents apartats.

4.5.2. S-1000 – Dron gran

El dron s1000, es tracta d'un dels models de la marca DJI, en el qual se l'hi ha canviat la controladora de vol i altres dispositius embarcats, per ajustar-lo a les necessitats del projecte. Consta d'uns motors de KV 400 rpm/V i amb una potència màxima de 500 W. Pel que fa a les hèlixs, són de 15x5.2 polzades.



Figura 4.15 - Dron s1000

Els resultats obtinguts de les gravacions d'àudio amb aquest dron varien segons l'altura, tal i com es podrà observar a continuació.

La gravadora d'àudio es va situar just a la part central inferior del xassís. Al mateix lloc on anava allotjada la bateria, assegurant així que estigues ben allunyada dels motors i alhora amb el micròfon encarat cap al terra, ja que és el lloc d'on provenen els sons que interessa captar.

Cal destacar que els vols es van realitzar en mode GPS, fet que feia que el dron estigués el més estable possible i els motors fessin el mínim soroll, ja que només havien de compensar el moviment causat per l'aire.

Vol realitzat a 5m d'altura:

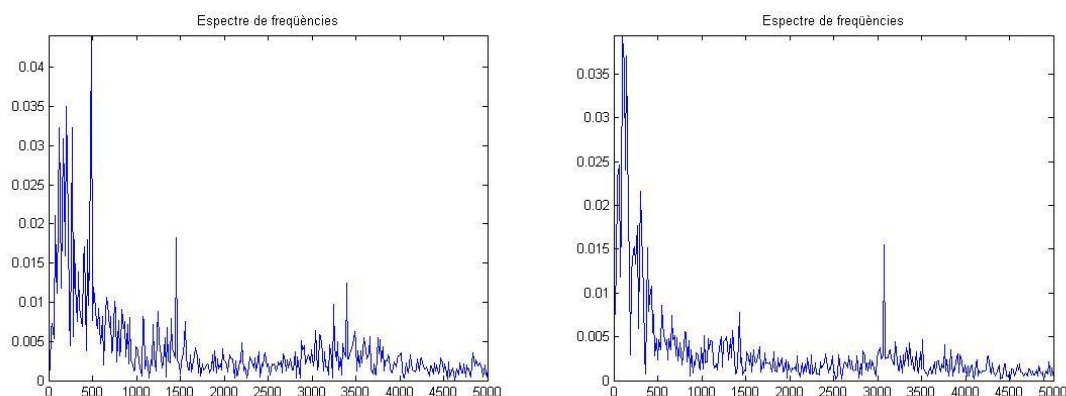


Figura 4.16 – Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 500 (figura de l'esquerra) i 1000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

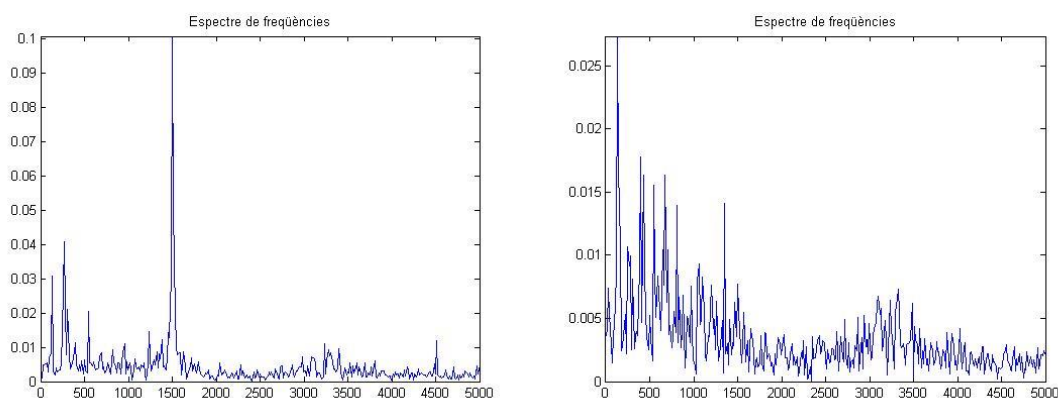


Figura 4.17 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 1500 (figura de l'esquerra) i 2000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

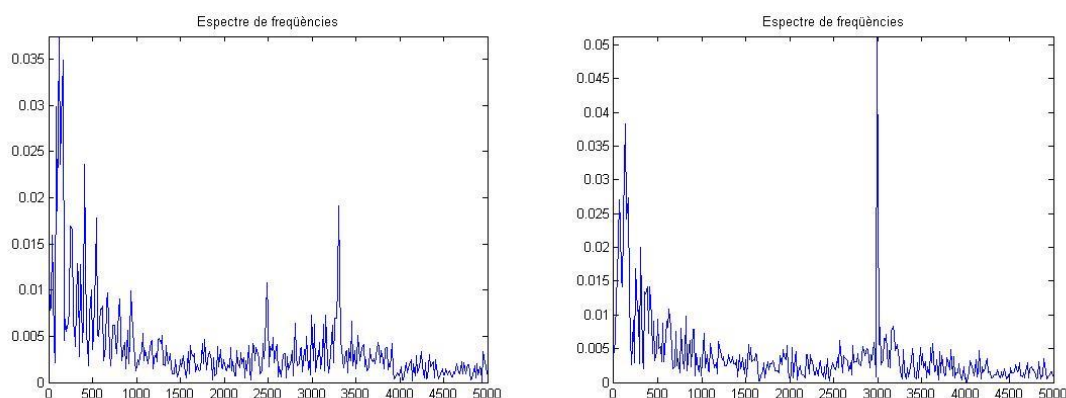


Figura 4.18 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 2500 (figura de l'esquerra) i 3000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

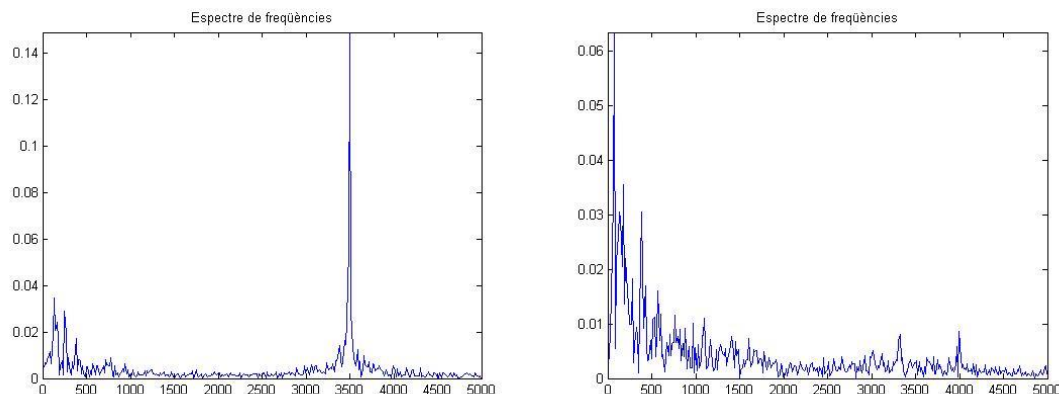


Figura 4.19 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 3500 (figura de l'esquerra) i 4000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

De les imatges anteriors, se'n poden derivar les següents conclusions. En primer lloc, tal i com es pot apreciar, el Dron és incapaç de detectar sons a freqüències inferiors a 1500 Hz i superiors a 3500 Hz. Pel que fa a les de 2000 i 2500 Hz, és un fet curiós que no les reconegui, ja que sí que reconeix les de 1500 i 3000 Hz respectivament, al estar incloses dins el rang de freqüències audibles, ens fa pensar que pot ser degut a un error en el generador d'ones.

Cal mencionar que les probes es van dur a terme en unes situacions climatològiques no gaire favorables degut al fort vent i això també pot afectar a les dades preses.

Vol realitzat a 10m d'altura:

Les gravacions obtingues a 10m, no mostren cap resultat acceptable fins a les freqüències de 3000 i 3500 Hz, en les quals es pot observar un petit pic.

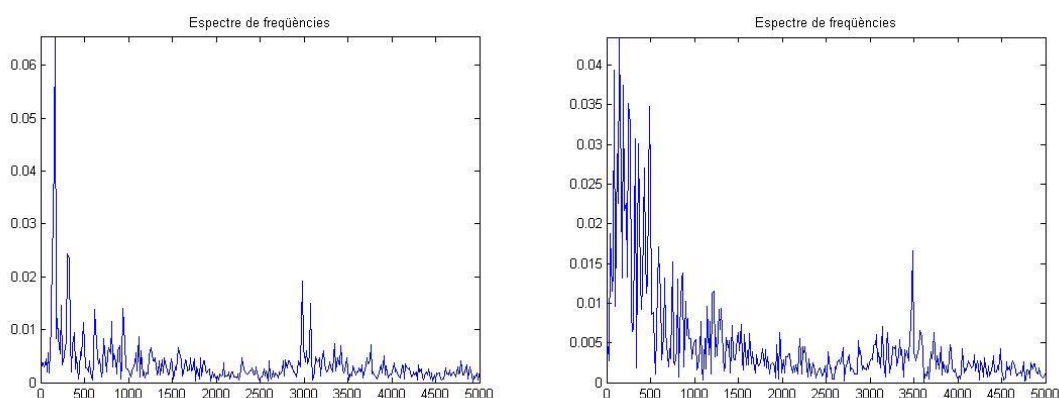


Figura 4.20 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 3000 (figura de l'esquerra) i 3500 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

De totes formes, encara que hi hagi un petit pic a la freqüència que pertoca, està molt present el soroll de l'aire a freqüències baixes. D'aquí se'n deriva la conclusió que al augmentar l'altura perdem rang de freqüències audibles.

Vol realitzat a 20m d'altura:

Pel que fa a les gravacions obtingudes amb el dron a 20 m d'altura, no n'hi ha cap en que es pugui apreciar la freqüència corresponent. Amb això en treiem la conclusió que 20 m es una distància massa àmplia com per captar sons amb un dron. Almenys de les característiques del s1000.

4.5.3. DM - Dron Mitjà

El dron mitjà, es tracta d'un model de xassís de la marca TAROT, en el qual s'hi han adaptat tots els altres dispositius. Per exemple, s'ha canviat la controladora de vol per una Pixhawk i molts altres elements s'han ajustat a les necessitats del projecte. Consta d'uns motors Multistar de KV 570 rpm/V amb unes hèlixs fabricades amb fibra de carboni de 15x5.5 polzades.



Figura 4.21 -Dron DM

Els àudios gravats amb aquest dron varien segons l'altura, tal i com es podrà observar a continuació.

Els vols també es van realitzar en mode GPS, aconseguint força estabilitat i que els motors emetessin amb el mínim soroll únicament compensant les desviacions provocades per l'aire.

Vol realitzat a 5m d'altura:

A les següents gràfiques es pot observar el comportament obtingut.

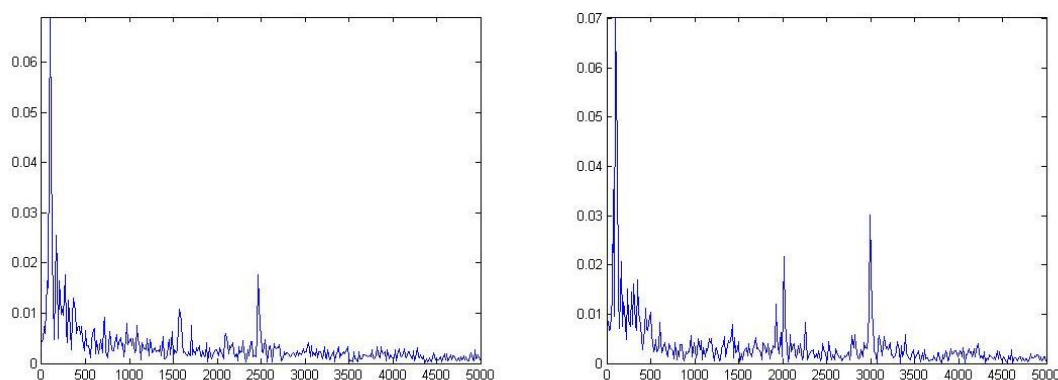


Figura 4.22 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 2500 (figura de l'esquerra) i 3000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

Pel que fa a freqüències baixes, no s'obtenen resultats clars fins a 2500 Hz, on es pot destacar un petit pic, accentuant-se més als 3000 Hz. Finalment, s'obté una gràfica clara a la freqüència de 3500 Hz (gràfica que es mostra a continuació) i als 4000 Hz, tornem a obtenir una gràfica plana.

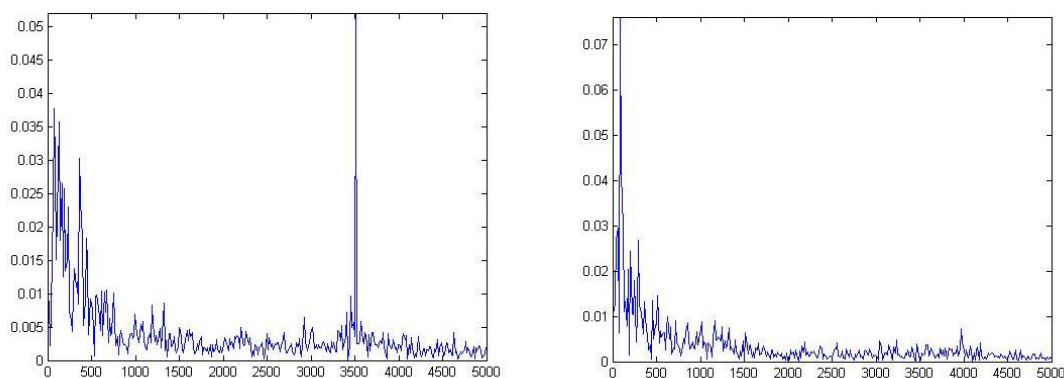


Figura 4.23 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 3500 (figura de l'esquerra) i 4000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

Així doncs, ens trobem gairebé amb els mateixos resultats obtinguts amb el s1000 a una altura de 5 m, destacant que tot i tenir uns motors més petits, amb aquest dron mitjà obtenim menys rang de freqüències audibles.

Vol realitzat a 10m d'altura:

Pel que fa a les gravacions obtingudes a 10 m d'altura, únicament es poden apreciar molt lleugerament alguns resultats per a les freqüències de 2500 a 3500 Hz. Altre cop la més destacable és aquesta darrera. A continuació es mostren les gràfiques obtingudes:

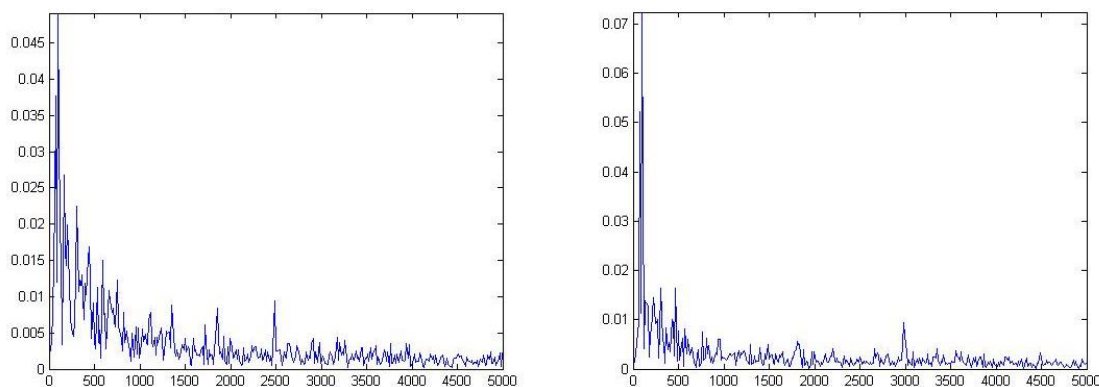


Figura 4.24 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 2500 (figura de l'esquerra) i 3000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

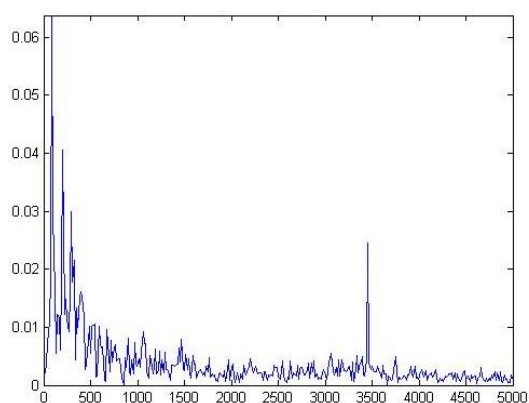


Figura 4.25 -Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 3500 Hz amb la mini-cadena

Vol realitzat a 20m d'altura:

Finalment, amb l'assaig realitzat a major altura, no s'obtenen resultats clars en cap de les freqüències, a excepció de la de 3500 Hz, que mostra un petit pic.

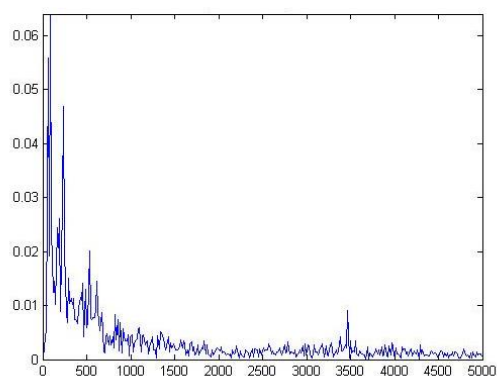


Figura 4.26 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 3500 Hz amb la mini-cadena

Cal dir que està molt més present les freqüències baixes, com la de l'aire o els motors, que la de 3500 Hz en sí. D'aquí en podem treure altre cop, que la distància des de la font emissora fins a la font receptora és massa elevada com per captar sons amb bona resolució.

4.5.4. DP - Dron Petit

El petit, és un model utilitzat per a curses de drons i utilitza un xassís de dimensions molt reduïdes, per aconseguir gran velocitat i esquivar obstacles més fàcilment. Consta d'uns motors molt potents i unes hèlixs de plàstic de 5x4.5 polzades.



Figura 4.27 - Dron DP

Els vols no es van poder realitzar en mode GPS, ja que no disposava d'aquest sistema. Per tant, es va pilotar en mode manual tota l'estona, i el pilot compensava els moviments provocats pel vent.

Els resultats obtinguts amb aquest dron, són totalment nuls a les tres altures utilitzades en els assaigs. Les gràfiques obtingudes són planes tan a 5, 10 i 20 m. D'aquest assaig en podem extreure varies conclusions. En primer lloc, al estar pilotat manualment, els motors havien de fer moltes més compensacions amb el vent i per tant feien molt més soroll, distorsionant la senyal de so. En segon lloc, al ser més petit, la gravadora estava molt més propera als motors, fet que podia ocasionar més interferències. I en tercer lloc, al no disposar de tren d'aterratge, la gravadora estava molt més exposada al vent i a altres factors distorsionadors de la senyal.

4.5.5. Caracterització del so dels motors

Per tal de comprovar a quina freqüència emeten el so els motors de l'aeronau, es van realitzar unes gravacions de cada un dels drons en règim de vol estàtic sense emetre cap so, només amb el dels motors i el so ambient, el que inclou l'aire present durant tot el dia de proves.

Aquestes dades es van prendre a fi de comprovar que el soroll present a freqüències baixes en totes les proves realitzades amb anterioritat es tractessin d'aquest fet, i efectivament així va ser.

A continuació es poden observar els resultats:

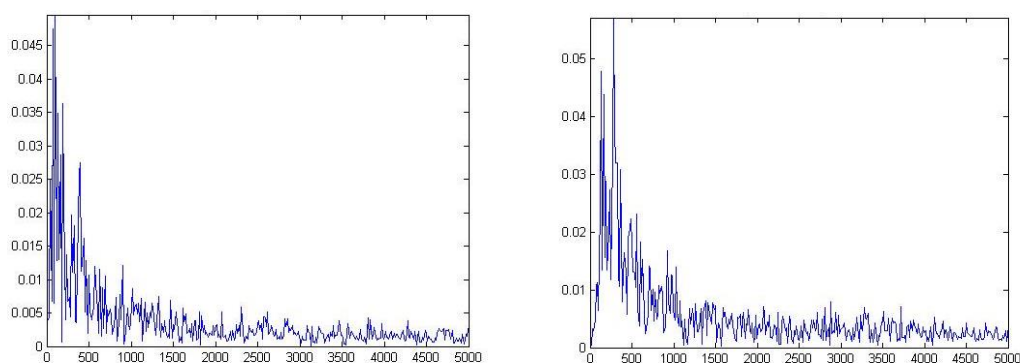


Figura 4.28 - Freqüències dels motors i aire dels drons DM (esquerra) i s-1000 (dreta)

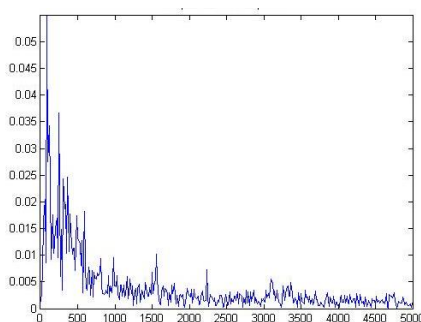


Figura 4.29 - Freqüència dels motors i aire del drone DP

De les gràfiques anteriors, extraïem la conclusió que la freqüència de la senyal de so emesa pels motors dels drons (DM i s1000) i l'aire, és d'aproximadament 250 Hz.

Pel que fa al dron petit, els motos utilitzats també treballen a freqüències baixes, i podem observar un pic en la de 200 Hz aproximadament.

Havent realitzat aquest anàlisi de l'espectre de freqüències en que treballen els motors i el propi aire, podem descartar qualsevol tipus de error en la presa de dades anteriorment gravades amb els drons mentre es formaven diferents sons amb la minicadena i el generador de funcions.

4.6. Filtratge de senyals

4.6.1. Introducció als filtres

En aquest apartat es farà una breu introducció als filtres i a les seves característiques de disseny.

Un filtre, genèricament parlant, és un sistema que discrimina part de l'objecte que processa, segons un o més atributs. Per exemple, un filtre d'aire deixa passar l'aire però impedeix el pas a les partícules de pols presents en ell. Un filtre en processament de senyal és un concepte molt ampli, donat que pot ser qualsevol sistema que tracti la senyal. Ens centrarem en els sistemes o filtres que, donada qualsevol senyal, permeten el pas d'un conjunt determinat de freqüències i atenuen o eliminen la resta.

La resposta desitjada del filtre, depèn exclusivament de la seva funció de transferència $T(s)$.

$$T(s) = \frac{a_M s^M + a_{M-1} s^{M-1} + \dots + a_1 s + a_0}{s^N + b_{N-1} s^{N-1} + \dots + b_1 s + b_0} \Rightarrow T(s) = \frac{a_M (s - z_1)(s - z_2) \dots (s - z_M)}{(s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_N)} \quad (\text{Eq 4.8})$$

El grau del denominador, N , equival a l'ordre del filtre i per tal que aquest sigui estable, ha de complir la condició $M \leq N$.

Els coeficients el numerador (a_0, a_1, \dots, a_M) i del denominador (b_0, b_1, \dots, b_{N-1}), són nombres reals. Les arrels del numerador (z_1, z_2, \dots, z_M) són els zeros de la funció de transferència, i les arrels del denominador (p_1, p_2, \dots, p_N) són els pols. Tan els pols com els zeros de la funció $T(s)$, poden ser nombres reals o complexos.

La banda de pas d'un filtre és el rang de freqüències que deixa passar de l'entrada a la sortida amb una atenuació, per exemple, més petita de 3 dB, o guany (aquest valor es pren per conveni i pot variar depenent de les especificacions del sistema). I la banda atenuada és la complementària.

Per extensió, les freqüències de pas i d'atenuació defineixen el rang de banda de pas i atenuada. En el cas d'un filtre ideal, la freqüència de pas i d'atenuació coincideixen en la freqüència de tall. Vegem la figura següent:

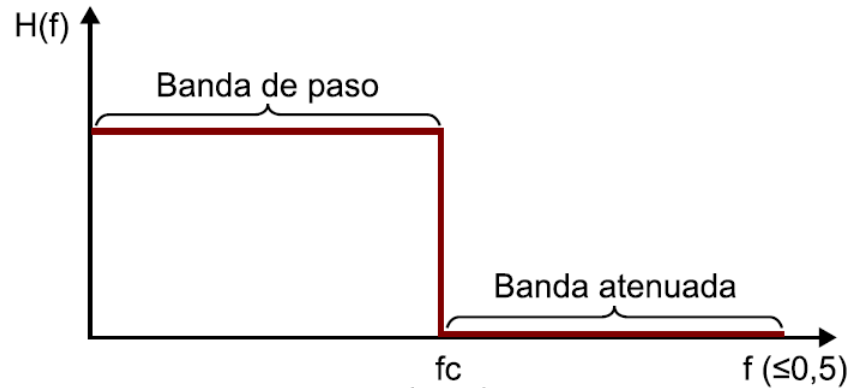


Figura 4.30 - Banda de pas i atenuada en un filtre LP ideal (Font: [24]. www.google.es/imagenes)

L'ordre del filtre, N o n , determina el pendent de la resposta freqüencial a la zona de transició entre la banda passant i la atenuada. Com més elevat sigui l'ordre del filtre, més bona serà l'aproximació.

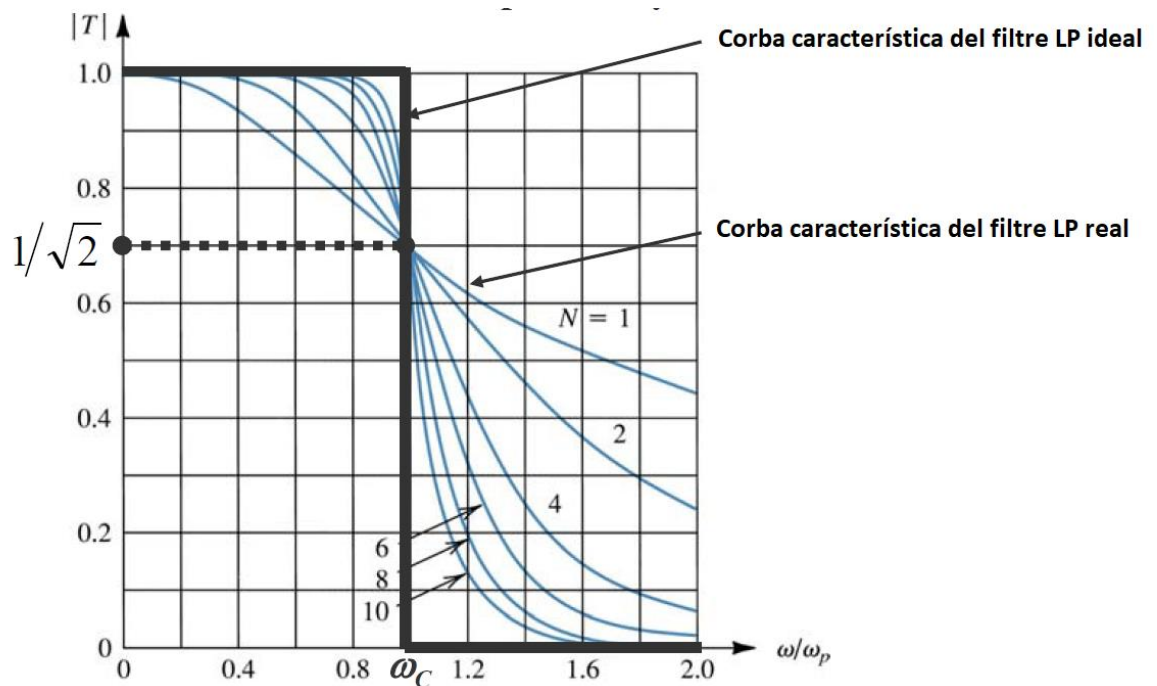


Figura 4.31 - Exemple corbes característiques ideal i reals d'un filtre (Font: [25]. EAEIA Apunts)

L'exemple de la figura anterior, equival a les representacions de les magnituds de les corbes característiques d'un filtre LP amb una resposta de tipus Butterworth. Tal i com s'ha comentat, podem

observar que a l'incrementar l'ordre del filtre (N), l'aproximació de la resposta s'acosta més a la ideal de pendent infinita.

4.6.2. Filtres analògics

Els filtres analògics són un tipus de filtre electrònic que modifica les components freqüencials d'un senyal analògic de forma diferent en funció de la seva freqüència.

Existeixen dos tipus de filtres segons el seu tractament de la senyal. En primer lloc tenim els lineals, que no afegeixen noves components freqüencials a l'espectre de la senyal d'entrada, d'aquesta forma si introduïm una senyal d'ona sinusoidal a l'entrada, aquesta ho seguirà essent a la sortida (sense distorsió) però amb més o menys atenuació i/o desfasada un cert nombre de graus. L'atenuació i el desfasament dependran del valor de la freqüència i dels paràmetres del filtre.

En segon lloc, tenim els no lineals, que modifiquen la forma de la senyal d'entrada al filtre i per tant l'espectre (afegint o eliminant components freqüencials). D'aquesta forma, amb aquest tipus de filtres a l'introduir una senyal sinusoidal, a la sortida podria deixar de ser-ho ja sigui per la limitació d'amplitud, el pendent de pujada i baixada, etc.

Aquests filtres es poden classificar de diferents formes.

Si ens fixem amb el guany, tenim per una banda els filtres passius, que són aquells que atenuaran el senyal en major o menor grau i s'implementen amb components passius com condensadors, bobines i resistències.

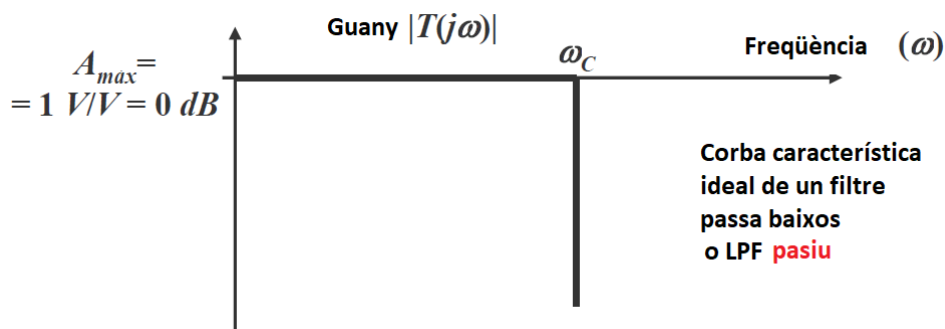


Figura 4.32 - Corba característica filtres passius (Font: [25]. EAEIA Apunts)

I per altra banda, els actius, que poden presentar guany en tota o part de la senyal de sortida respecte a la d'entrada, en la seva implementació solen aparèixer amplificadors operacionals, i no solen contenir bobines, excepte en el cas de freqüències molt altes.

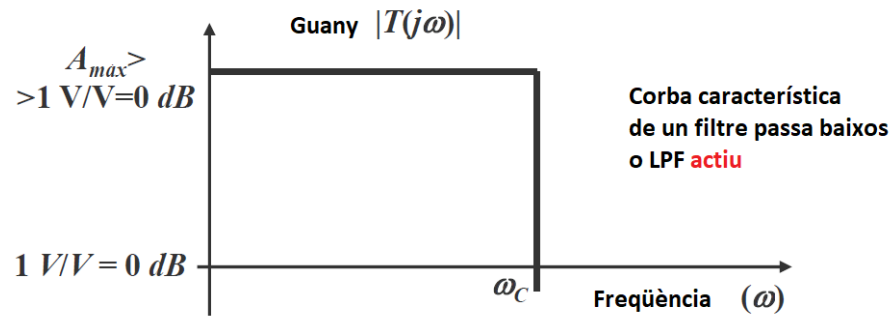


Figura 4.33 - Corba característica filtres actius (Font: [25]. EAEIA Apunts)

A la següent taula es descriuen els avantatges i el inconvenients dels filtres actius respecte als passius:

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> No requereixen l'ús d'inductàncies o transformadors, evitant així problemes de volum, pes, preu, pèrdues per dispersió de camp magnètic, etc. Poden obtenir guany (amplificació) de la senyal en banda passant. Fàcil interconnexió en cascada per a disseny de filtres d'ordre superior. Alta flexibilitat, escalabilitat i repetibilitat de cèl·lules en el disseny. 	<ul style="list-style-type: none"> Requereixen alimentació DC. La resposta en freqüència està limitada a la capacitat dels elements actius utilitzats en el disseny. Afecta per a freqüències altes (centenars de kHz) Les característiques del filtre (freqüències de tall, factor de qualitat, etc.) es veuen afectades per derives tèrmiques i de la tensió d'alimentació, envelleiment dels components del circuit, etc.

Taula 4.6 – Avantatges i inconvenients dels filtres actius respecte els passius (Font EAEIA Apunts)

Si en canvi, parem atenció a la seva resposta en freqüència, tenim que els més destacats són:

Filtres passa baixos o LPF (Low Pass Filters): És aquell que permet el pas de freqüències baixes, des de freqüència 0 o contínua fins a una determinada. Presenten zeros a alta freqüència i pols a baixes freqüències.

Filtre passa alts o HPF (High Pass Filter): És el que permet el pas de freqüències des d'una freqüència de tall determinada cap amunt, sense que existeixi un límit superior especificat. Presenten zeros a baixes freqüències i pols a altes freqüències.

Filtres passa banda o BPF (Band Pass filters): Són aquells que permeten el pas de components freqüencials continguts en un determinat rang de freqüències, comprès entre una freqüència de tall inferior i una altra de superior.

Filtre elimina banda o BRF (Band Reject Filter): És el que dificulta el pas de components freqüencials continguts en un determinat rang de freqüències, comprès entre una freqüència de tall superior i una altra d'inferior.

Filtre passa tot o equalitzador de fase: Idealment no presenta atenuació, sinó que influeix només sobre la fase.

Filtres multibanda: Són els que presenten diversos rangs de freqüències en els quals hi ha un comportament diferent

Filtre variable: És aquell que pot canviar els seus marges de freqüència

A la següent imatge podem observar la simbologia utilitzada per a representar cada un dels filtres descrits anteriorment.

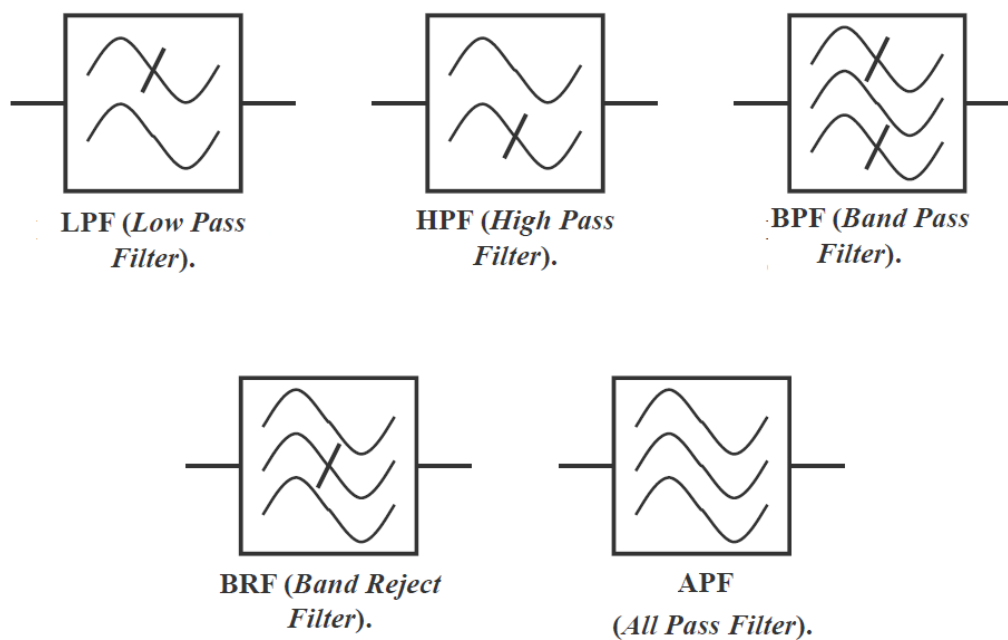


Figura 4.34 - Simbologia utilitzada per als filtres (Font: [25]. EAEIA Apunts)

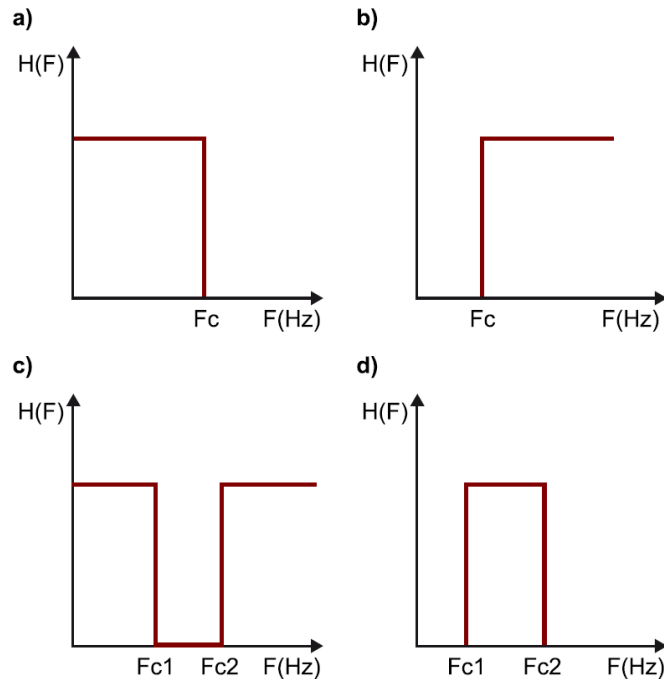


Figura 4.35 - Resposta ideal dels filtres a: passa baixos, b: passa alts, c: elimina banda i d: passa banda (Font: [24]. www.google.es)

Pel que fa a les tipologies típiques utilitzades en el disseny de filtres analògics de temps continu actius, en podem destacar les més rellevants:

- Estructura de Sallen Key o filtres KRC.
- Estructura de Rauch o amb realimentació múltiple.
- Estructura de variable d'estat i biquadràtica (filtres actius universals).
- Estructura en doble T (twin T).

I finalment, si volem classificar les tècniques de filtratge segons el tipus de resposta utilitzada, tenim:

- Resposta de Butterworth.
- Resposta tipus Tchebyscheff.
- Resposta de Tchebyscheff inversa.
- Resposta tipus Bessel o Thomson.
- Resposta de tipus Legendre o Papoulis.
- Resposta de tipus Cauer, el·líptics, de Jacobi o Zolotarev.

4.6.3. Filtres digitals

Els filtres digitals, són bastant diferents als analògics, tan en físic com en el mode de funcionament.

Un filtre digital, utilitza un processador que efectui operacions matemàtiques en valors mostrejats de la senyal. Aquest processador pot ser de propòsit general, com qualsevol ordinador personal, un xip processador digital de senyal especialitzat, o una FPGA (Field programmable gate array), és a dir, una matriu de portes lògiques programable.

En aquests filtres, la senyal d'entrada analògica, a de ser mostrejada i digitalitzada utilitzant un ADC (Analògic to Digital Converter o Convertidor Analògic-digital en català). El resultat, són nombres binaris que representen els valors successius mostrejats. Aquests, són transferits al processador, el qual efectua les operacions matemàtiques en ells. Les operacions poden ser des de càlculs de mitjana amb la mostra actual i les anteriors, fins a multiplicacions per constants dels valors d'entrada o d'instants anteriors emmagatzemats en memòria, per posteriorment donar un valor de sortida. És a dir, operacions pròpies de sistemes lineals: convolucions en el domini del temps (multiplicació en el domini de la freqüència) amb altres senyals prefixades que consisteixen en una cadena de coeficients.

Finalment, si és necessari, els resultats dels càlculs, que estan representant valors mostrejats de la senyal filtrada, són enviats a través de un DAC (Digital to Analog Converter o Convertidor Analògic-digital) per tornar a transformar la senyal a la seva forma analògica. Per tant, en un filtre digital la senyal està sempre representada per una seqüència de nombres, enlloc d'un voltatge o una corrent.

El següent diagrama mostra l'esquema bàsic d'un d'aquests sistemes:

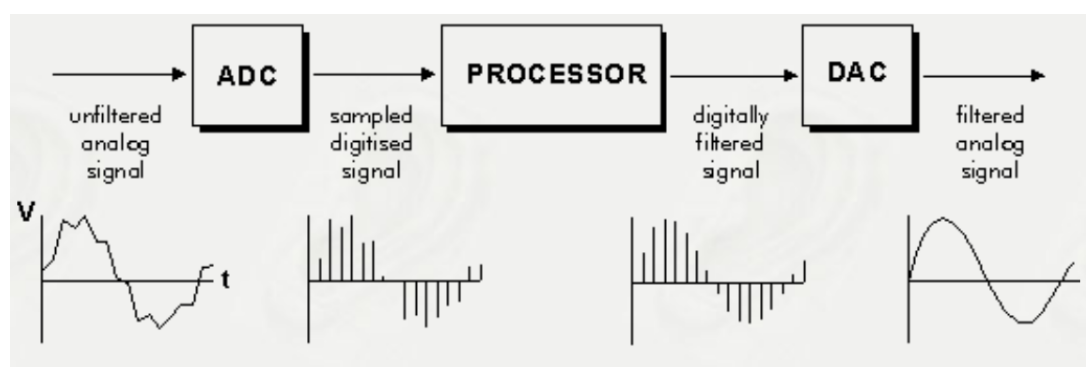


Figura 4.36 - Diagrama de processat dels filtres (Font: [24]. www.google.es)

4.6.4. Disseny d'un filtre

Per al disseny de filtres, existeixen varies funcions d'aproximació que ofereixen diferents respostes. Per una banda, tindríem les funcions d'aproximació polinòmies, que tal i com indica el seu nom, la seva funció de transmissió, $T(s)$, és un polinomi, i per l'altra les no polinòmies, les quals presenten una funció de transmissió en forma de fraccions racionals.

Podem dir que les funcions de transferència de les polinòmies, en el cas d'un filtre passa baixos normalitzat, amb la forma $H_{LP,N}(s)=1/T(s)$, té un denominador consistent en un polinomi en 's', amb 'n' arrels i el seu grau coincideix amb l'ordre 'n' del filtre a dissenyar. El numerador és una constant, per tant aquesta funció no presenta cap zero i així mateix, cap freqüència en la que l'atenuació sigui infinita.

En el cas de les no polinòmies, el numerador és també un polinomi en 's', amb 'm' arrels, que coincideix amb el grau 'm' de la funció i que ha de ser igual o menor al grau del denominador per tal que el filtre sigui estable. Aquesta funció sí que tindrà tan zeros com pols.

Pel que fa a les polinòmies, les més utilitzades són les de Butterworth i les de Tchebyshev, però també es coneixen les de Legendre, Bessel i la Gaussiana. I de les no polinòmies, la més popular és la de Cauer, però també s'utilitza força la inversa de Tchebyshev.

A continuació es mostren algunes de les aproximacions mencionades anteriorment i també les més destacades.

Aproximació de Butterworth:

La funció de transferència seria la següent:

$$H_{Bu}(s) = \frac{1}{T_{Bu}(s)} \quad (\text{Eq 4.9})$$

On el polinomi a utilitzar segons l'ordre del filtre vindria marcat per la següent taula:

Ordre	Polinomis de Butterworth $T_{Bu}(s)$
$n=1$	$s + 1$
$n=2$	$s^2 + \sqrt{2} \cdot s + 1$
$n=3$	$(s + 1) \cdot (s^2 + s + 1)$
$n=4$	$(s^2 + 1,8478 \cdot s + 1) \cdot (s^2 + 0,7654 \cdot s + 1)$
$n=5$	$(s + 1) \cdot (s^2 + 1,6180 \cdot s + 1) \cdot (s^2 + 0,6180 \cdot s + 1)$

Taula 4.7 – Polinomis d'aproximació de Butterworth (Font: [27]. EAEIA Apunts)

A continuació es mostra una figura amb el resultat de les diferents aproximacions segons l'ordre del filtre:

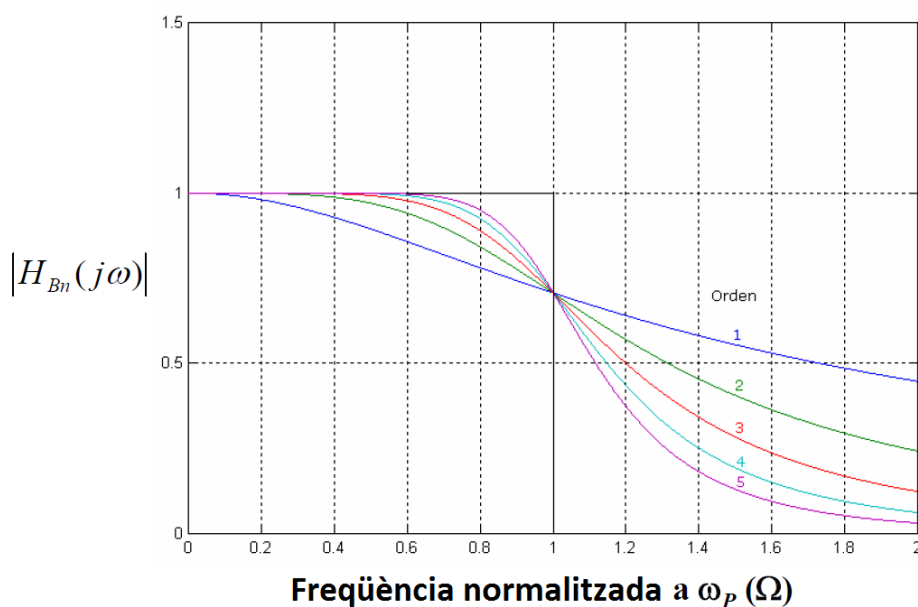


Figura 4.37 - Aproximació de Butterworth (Font: [27]. EAEIA Apunts)

Aproximació de Legendre:

La funció de transferència de l'aproximació de Legendre seria la següent:

$$H_{Le}(s) = \frac{1}{T_{Le}(s)} \quad (\text{Eq 4.10})$$

I el polinomi a utilitzar segons l'ordre del filtre es pot consultar a la taula següent:

Ordre	Polinomis de Legendre $T_{Le}(s)$
$n=1$	$s + 1$
$n=2$	$s^2 + \sqrt{2} \cdot s + 1$
$n=3$	$(1,612 \cdot s + 1) \cdot (1,0774 \cdot s^2 + 0,7417 \cdot s + 1)$
$n=4$	$(2,3213 \cdot s^2 + 2,5522 \cdot s + 1) \cdot (1,0552 \cdot s^2 + 0,4889 \cdot s + 1)$
$n=5$	$(2,136 \cdot s + 1) \cdot (1,0406 \cdot s^2 + 0,3196 \cdot s + 1) \cdot (2,0115 \cdot s^2 + 1,5614 \cdot s + 1)$

Taula 4.8 – Polinomis d'aproximació de Legendre (Font: [27]. EAEIA Apunts)

A continuació es mostra una figura amb el resultat de les diferents aproximacions segons l'ordre del filtre.

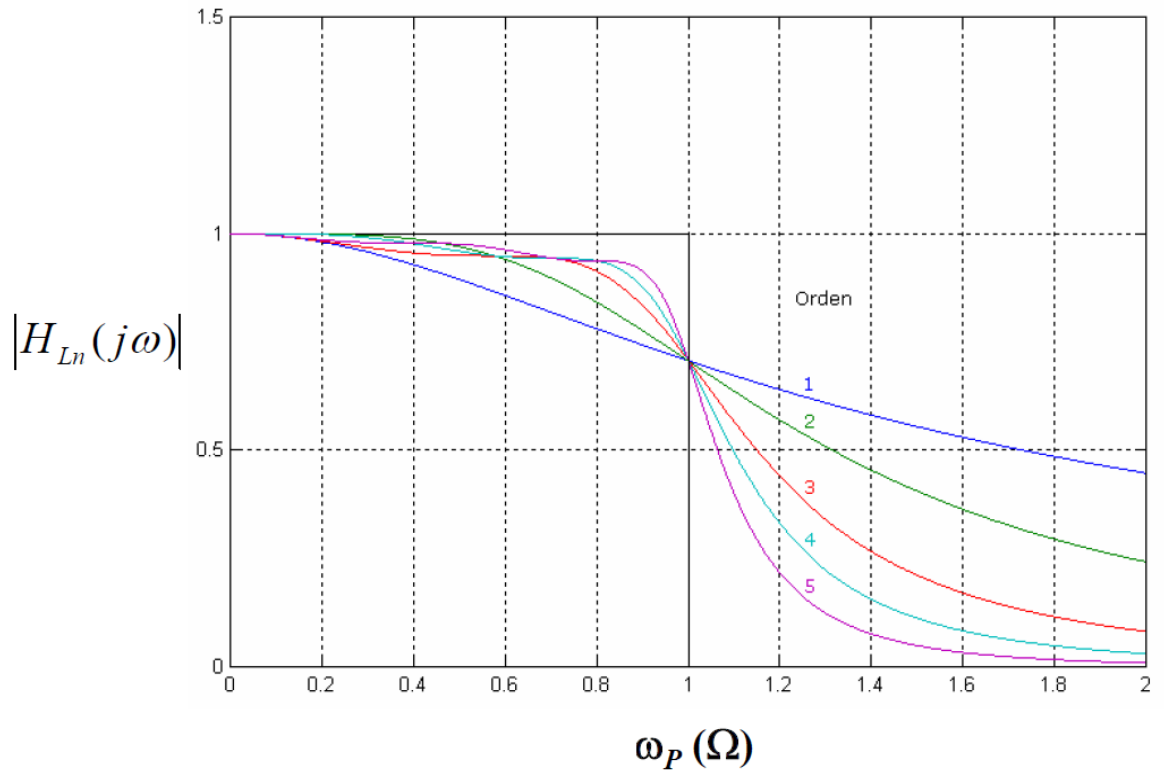


Figura 4.38 - Aproximació de Legendre (Font: [27]. EAEIA Apunts)

Tal i com es pot observar i ja s'havia comentat anteriorment, al augmentar l'ordre del filtre, la pendent de la recta d'aproximació és molt més gran i per tant s'aproxima més a la resposta ideal de pendent infinita.

Aproximació de Chebyshev:

La funció de transferència seria la següent:

$$H_{ch}(s) = \frac{1}{T_{ch}(s)} \quad (\text{Eq 4.11})$$

$$\varepsilon = \sqrt{-1 + 10^{\frac{A_{max}}{10}}} \quad (\text{Eq 4.12})$$

On el polinomi a utilitzar segons l'ordre del filtre i amb un ripple o arrissar de 3dB, vindria marcat per la següent taula:

Ordre	Polinomis de Chebyshev $T_{Ch}(s)$
$n=1$	$s+1,0023$
$n=2$	$s^2 + 0,6449 \cdot s + 0,7079$
$n=3$	$(s+0,2986) \cdot (s^2 + 0,2986 \cdot s + 0,8392)$
$n=4$	$(s^2 + 0,1703 \cdot s + 0,9031) \cdot (s^2 + 0,4112 \cdot s + 0,1960)$
$n=5$	$(s+0,1775) \cdot (s^2 + 0,1097 \cdot s + 0,9360) \cdot (s^2 + 0,2873 \cdot s + 0,3770)$

Taula 4.9 - Polinomis d'aproximació de Tchebyshev $\varepsilon = 0,998$ (Font: [27]. EAEIA Apunts)

I a continuació es mostra una figura amb el resultat de les diferents aproximacions segons l'ordre del filtre.

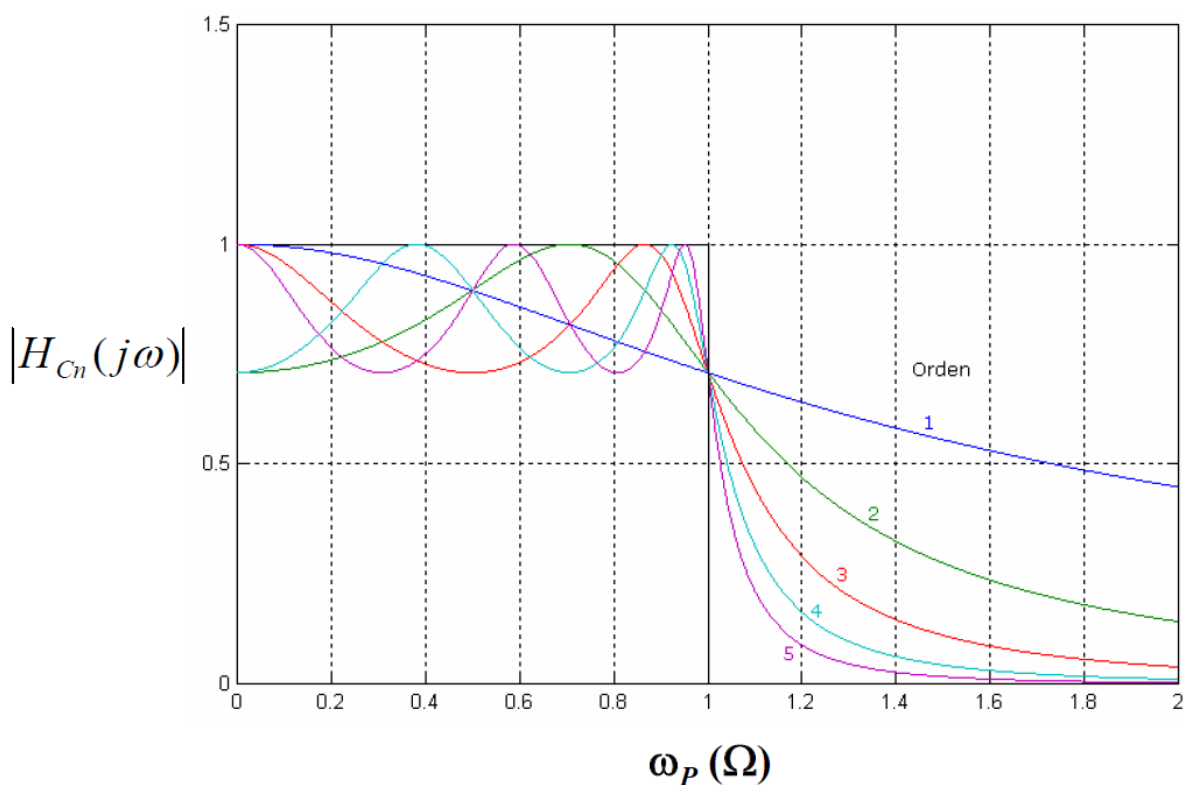


Figura 4.39 - Aproximació de Chebyshev – Ripple 3dB (Font: [27]. EAEIA Apunts)

Si en canvi volem un arrissat de 1 dB, tenim la taula següent de funcions d'aproximació:

Ordre	Polinomis de Chebyshev $T_{Ch}(s)$
$n=1$	$s + 1,9652$
$n=2$	$s^2 + 1,0977 \cdot s + 1,1025$
$n=3$	$(s + 0,4942) \cdot (s^2 + 0,4942 \cdot s + 0,9942)$
$n=4$	$(s^2 + 0,2791 \cdot s + 0,9865) \cdot (s^2 + 0,6737 \cdot s + 0,2794)$
$n=5$	$(s + 0,2895) \cdot (s^2 + 0,1789 \cdot s + 0,9883) \cdot (s^2 + 0,4684 \cdot s + 0,4293)$

Taula 4.10 - Polinomis d'aproximació de Tchebyshev $\varepsilon = 0,509$ (Font: [27]. EAEIA Apunts)

Pel que fa al resultat de les diferents aproximacions segons l'ordre del filtre, podem observar unes aproximacions a la següent gràfica:

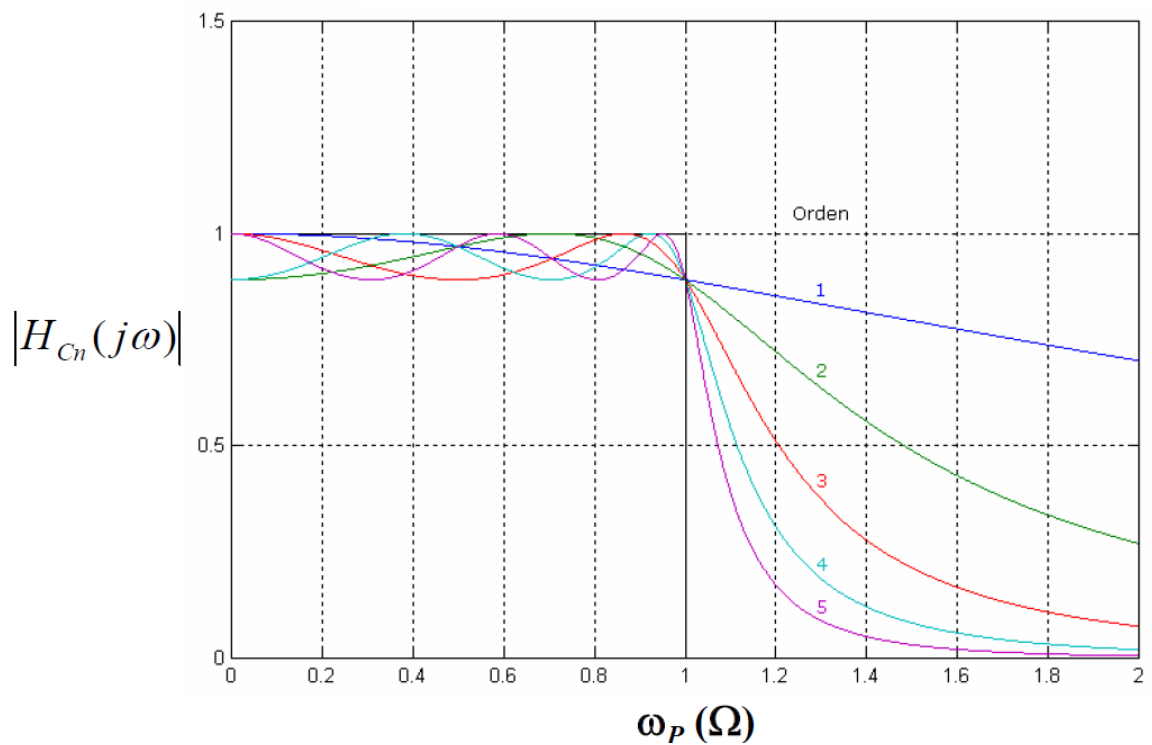


Figura 4.40 - Aproximació de Chebyshev – Ripple 1dB (Font: [27]. EAEIA Apunts)

Es pot observar que l'aproximació d'ordre 1, s'allunya molt del filtratge desitjat, mentre que el d'ordre 5, ja és una resposta bastant acceptable.

Per destacar encara més la importància del ripple, a la següent gràfica podem observar que si el “ripple” o arrissat, és major, amb el mateix ordre, tenim un filtre més selectiu (s’acosta més al filtre ideal). Però la presència d’aquest, és un efecte no desitjat en la banda passant.

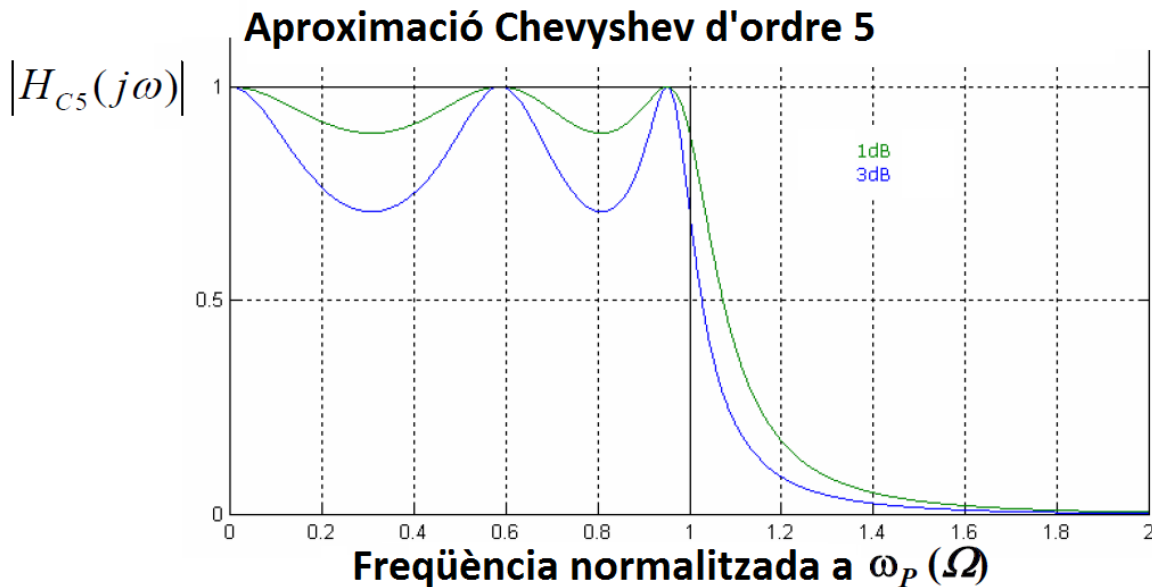


Figura 4.41 - Aproximació de Chebyshev ordre 5 (Font: [27]. EAEIA Apunts)

El nombre de màxims i mínims en el ripple de la banda passant és igual a l'ordre 'n' del filtre. L'origen (0 Hz), també és un màxim o mínim local.

Comparativa entre funcions d'aproximació:

Per tal de poder observar en primera instància la diferència entre les diferents aproximacions que s'han anat comentant o mostrant anteriorment, s'han preparat una sèrie de gràfiques mostrant amb gran detall cada una d'aquestes.

Es representen totes superposades en una mateixa gràfica de tal forma que sigui molt més visual i es pugui fer una idea més acurada del que aporta cada resposta.

Evidentment cada una de les aproximacions té les seves avantatges i inconvenients, però les principals diferències estan en el pendent de la recta d'aproximació i en l'arrissat, tal i com es pot observar a continuació.

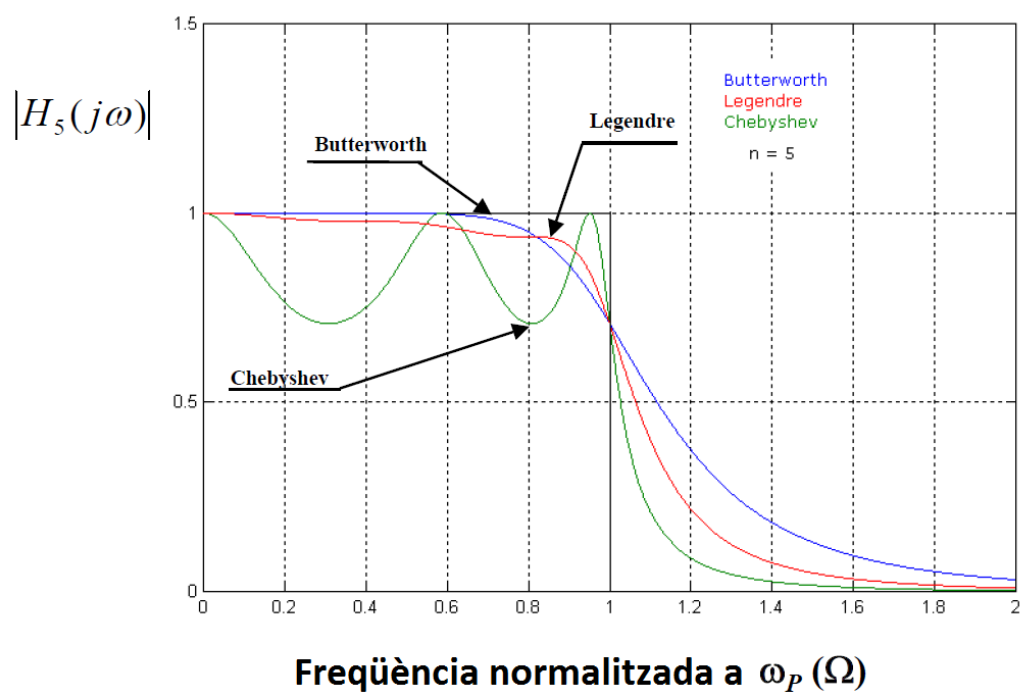


Figura 4.42 - Gràfica comparativa de funcions d'aproximació (Font: [27]. EAEIA Apunts)

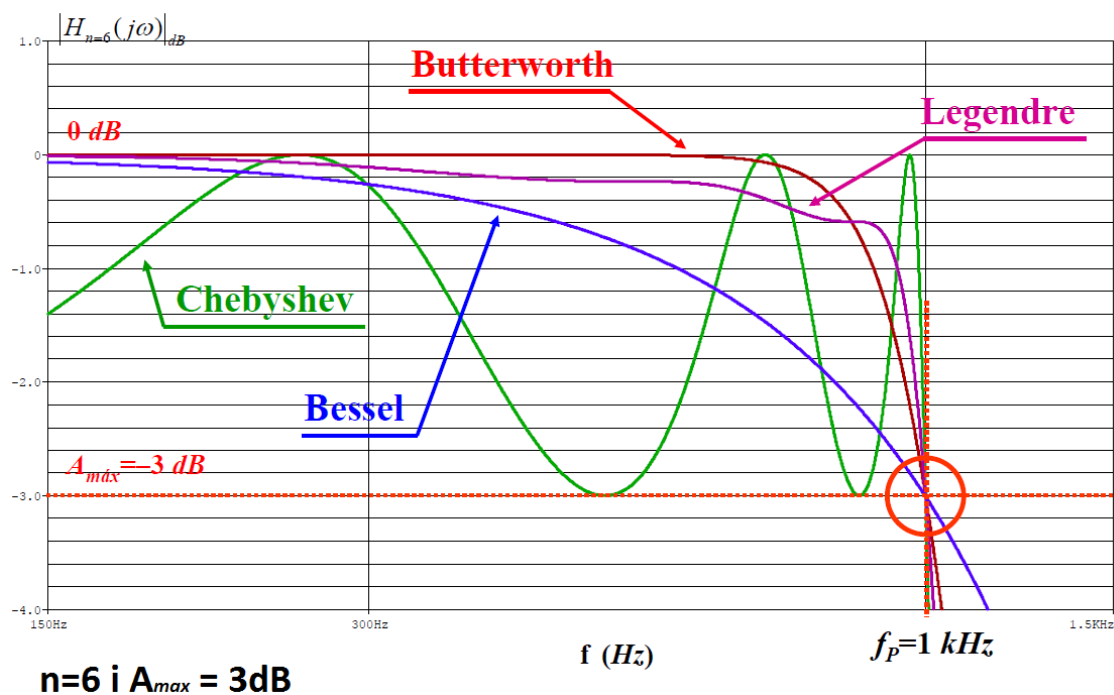


Figura 4.43 - Zoom gràfica comparativa de funcions d'aproximació (Font: [27]. EAEIA Apunts)

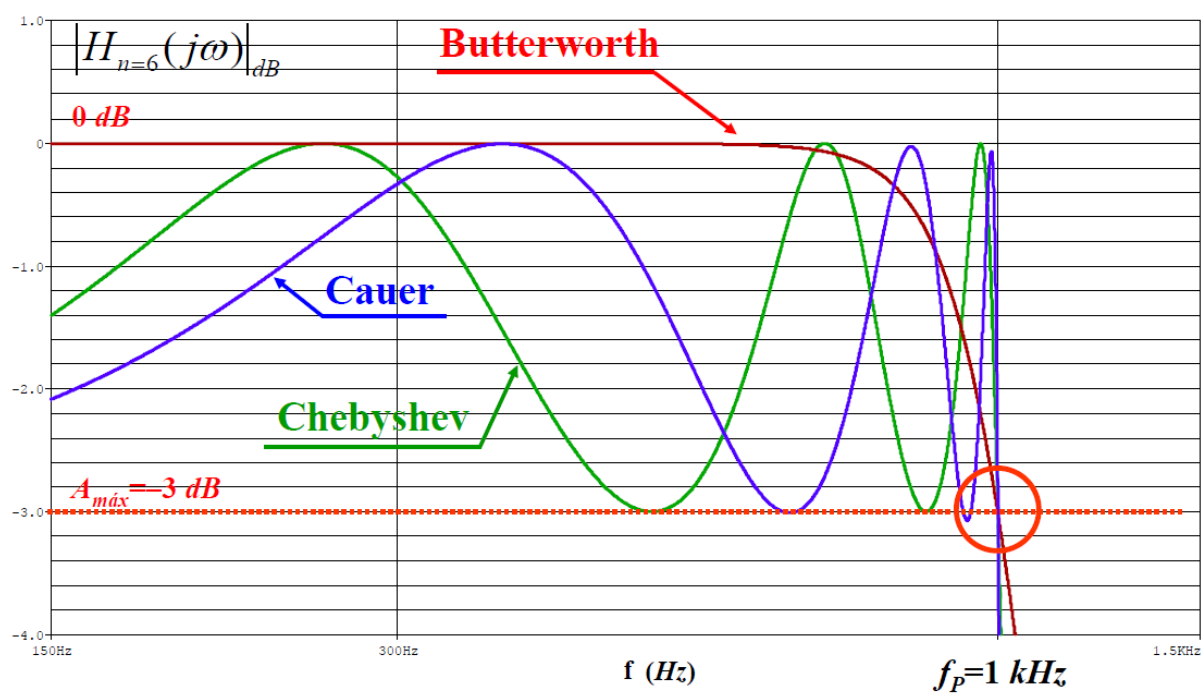


Figura 4.44 - Zoom gràfica comparativa de funcions d'aproximació 2 (Font: [27]. EAEIA Apunts)

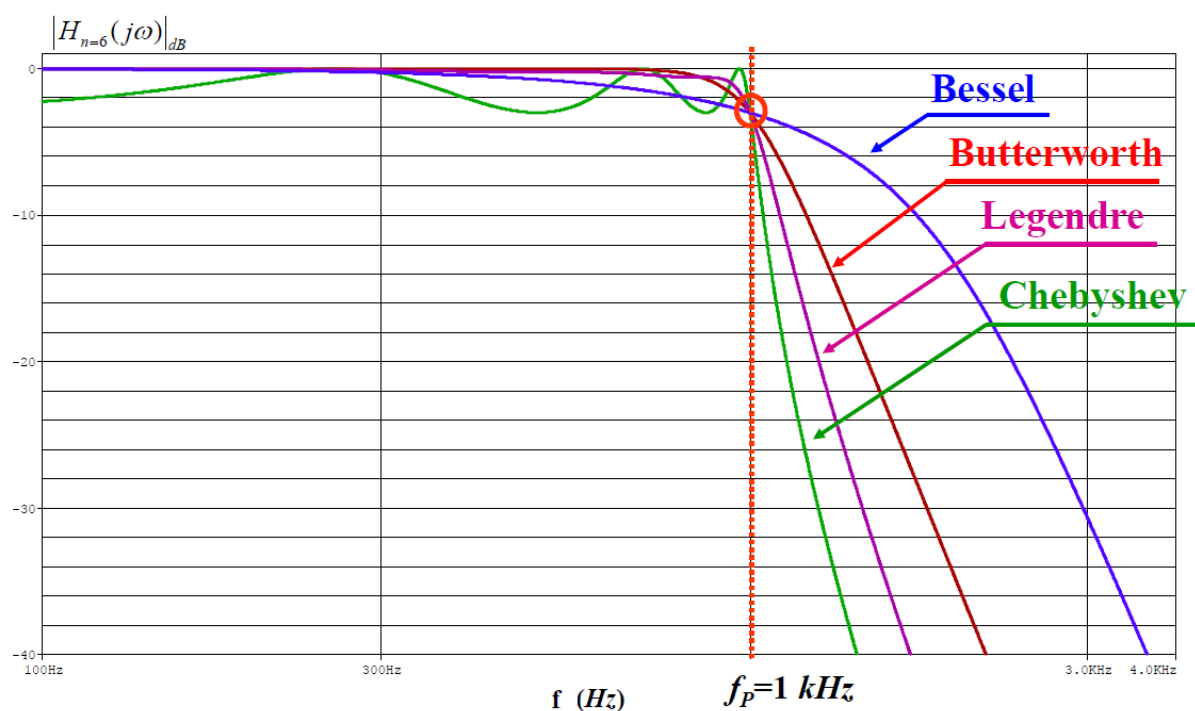


Figura 4.45 - Zoom gràfica comparativa de funcions d'aproximació 3 (Font: [27]. EAEIA Apunts)

4.6.5. Selecció del filtre i implementació

Després de dur a terme una comparativa dels diferents tipus de filtres existents i de les funcions d'aproximació que se'n deriven, s'ha decidit dissenyar un filtre analògic amb l'aproximació de Butterworth, ja que els filtres digitals no s'han estudiat en el grau.

Per al disseny de filtres d'ordre superior, s'han de seguir el següents passos:

1. Escollir la funció d'aproximació adequada a les especificacions del filtre.
2. Consultar Àbacs, software o fórmules matemàtiques adequades.
3. Escollir l'ordre 'n' que es necessita per implementar el filtre.
4. Consultar taules de polinomis o el software adequat (MATLAB, etc.) i obtenir el polinomi d'aproximació $T(s)$ de grau igual a l'ordre 'n' requerit.
5. Mitjançant la funció $H_{LP,N}(s)=1/T(s)$, obtenim el filtre LP prototip (normalitzat)
6. Per aconseguir els filtres HP, BP, BR o AP cal dur a terme un pas més que és la transposició en freqüència mitjançant la substitució en el polinomi de $s=1/s$, etc.
7. Després cal fer la desnormalització o escalat en freqüència del filtre amb la substitució de variable $s=s/\omega_p$.
8. Finalment, cal escollir la topologia adequada per al filtre (Rauch, Sallen-Key, UAF, etc.) i un cop seleccionada la que més s'adeqüi a les necessitats de l'aplicació, només cal dur a terme la implementació física del filtre desnormalitzat.

NOTA: El pas 6 es pot dur a terme tan abans com després de la desnormalització o escalat en freqüència (pas 7).

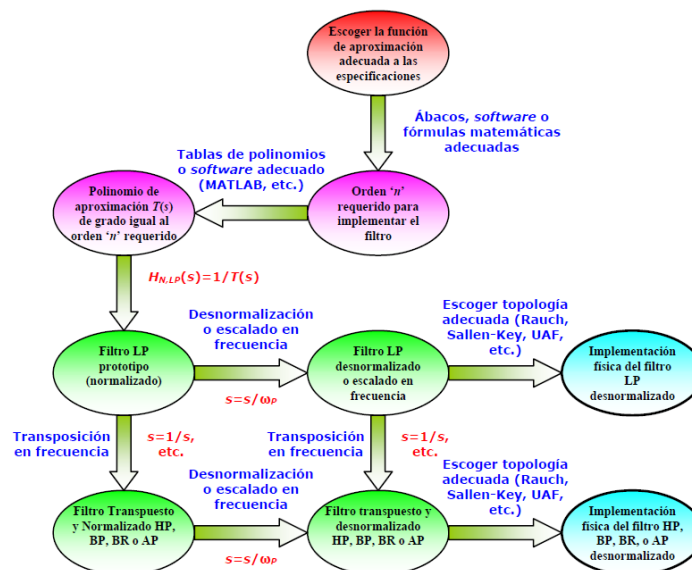


Figura 4.46 – Passos a seguir per al disseny de filtres d'ordre superior (Font: [25]. Apunts EAEIA)

Pel que fa al filtre desitjat per al projecte en qüestió, després d'haver analitzat els espectres de freqüència audibles amb el drone, s'han extret els següents paràmetres de disseny que el caracteritzaran:

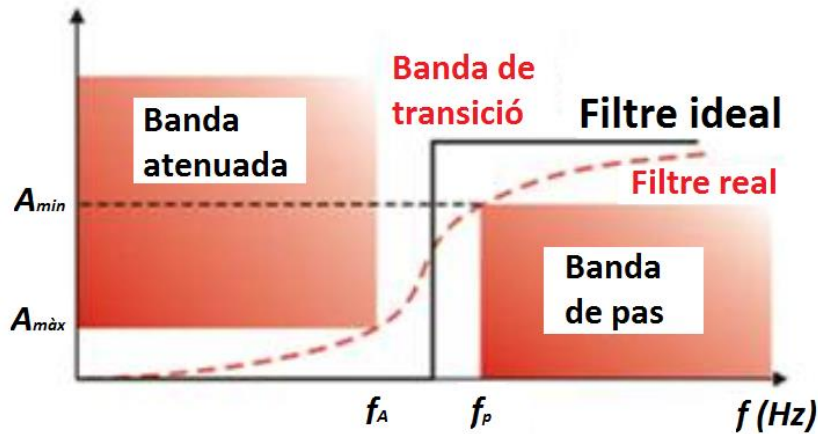


Figura 4.47 - Gàlib del filtre a dissenyar

- Freqüència mínima de la banda de pas: $f_p = 1500$ Hz
- Freqüència màxima de la banda atenuada: $f_A = 500$ Hz
- Atenuació màxima de la banda de pas: $A_{màx} = 30$ dB
- Atenuació mínima de la banda atenuada: $A_{min} = 3$ dB

Per a l'obtenció de l'ordre del filtre, en el cas de Butterworth, no és necessari recórrer a complexes equacions matemàtiques, ja que amb el fi d'evitar-les existeixen una sèrie d'àbacs que permeten determinar l'ordre d'aquest, en funció del tipus d'aproximació i els paràmetres que delimiten el gàlib del filtre.

Un primer tipus d'àbac amb el que es pot determinar l'ordre és el de la figura que es mostra a continuació. Aquest únicament contempla la utilització de tres dels paràmetres especificats anteriorment: f_p , f_A i $A_{màx}$. El valor de A_{min} es considera igual a 3dB.

Per al filtre que es vol dissenyar, la línia vertical va marcada segons el resultat del quocient següent:

$$\frac{f_p}{f_A} = \frac{1500}{500} = 3 \quad (\text{Eq. 4.13})$$

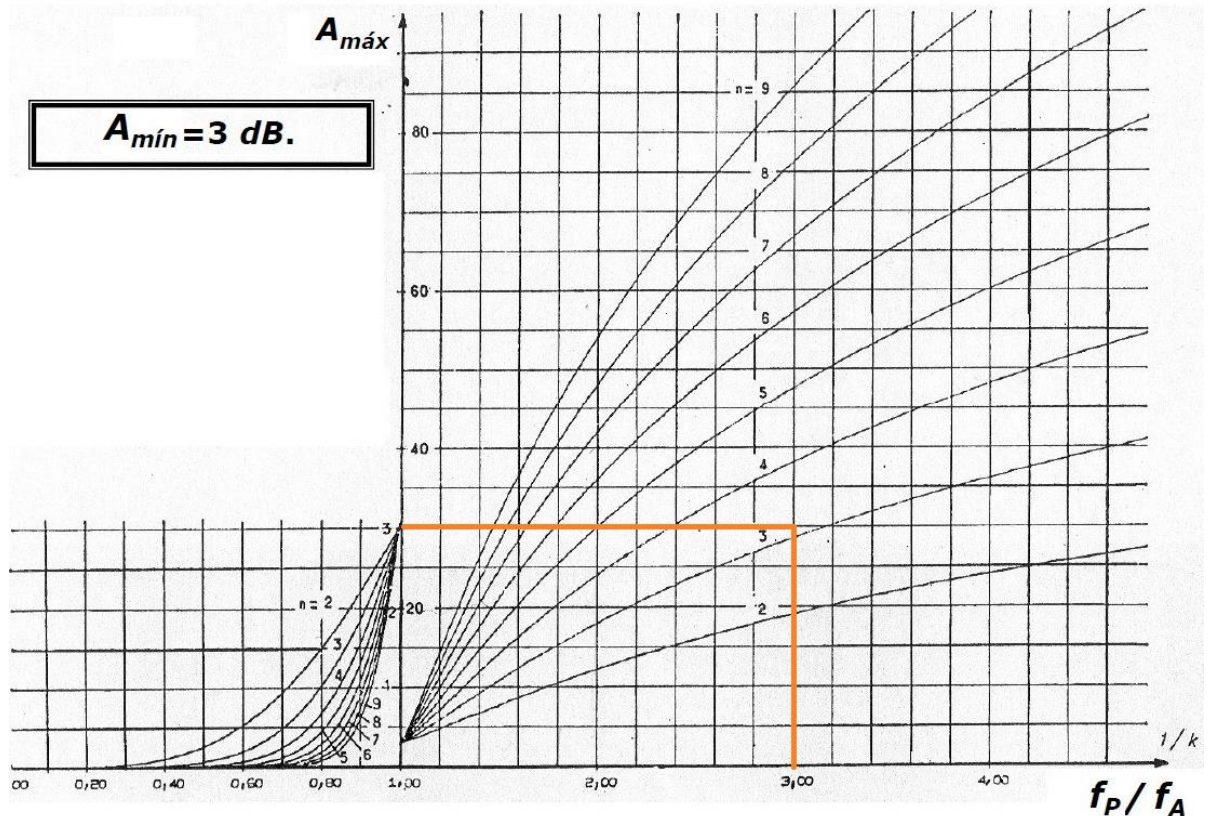


Figura 4.48 - Abac d'aproximació per determinar l'ordre en filtres Butterworth (Font: [26]. Apunts EAEIA)

La utilització d'aquest gràfic és simple, consisteix en traçar dues línies, una vertical i l'altra horitzontal. Pel que fa a la horitzontal, es marca en el valor de l'atenuació màxima de la banda de pas ($A_{máx}$) i la vertical en el valor igual al quocient (f_p / f_A). El punt d'intersecció entre ambdues línies determina l'ordre mínim necessari, n , per al filtre. Així doncs, s'agafa com a referència la línia de l'àbac immediatament superior al punt d'intersecció.

Les corbes representades a la part inferior esquerra, representen la forma d'atenuació en la banda de pas per als valors inferiors a la unitat del quocient f_p / f_A . No tenen validesa per a escollir l'ordre del filtre a dissenyar en aquest cas, ja que és superior a 1.

Quan es tracta d'un filtre passa baixos, el procés és absolutament igual, amb la variant que en l'eix de les abscisses (horitzontal), el quocient que s'ha de fer és la inversa, és a dir, f_A / f_p . De fet, l'àbac original és per a filtres passa-baixos, però a la imatge s'han modificat els valors, adaptant-ho als passa-alts per a que quedés més entenedor i no crees confusió.

En el cas que es coneguin els 4 paràmetres, i es vulgui ajustar més l'ordre del filtre, existeix un altre àbac que funciona de forma similar amb la variant que té 2 eixos verticals amb els valors de $A_{m\grave{a}x}$ i $A_{m\grave{i}n}$. Al traçar una línia que uneixi els dos valors, es determina el punt de tall amb l'eix vertical de l'àbac i el procediment ja serà igual que en el cas anterior. Es pot observar més detalladament en la següent imatge:

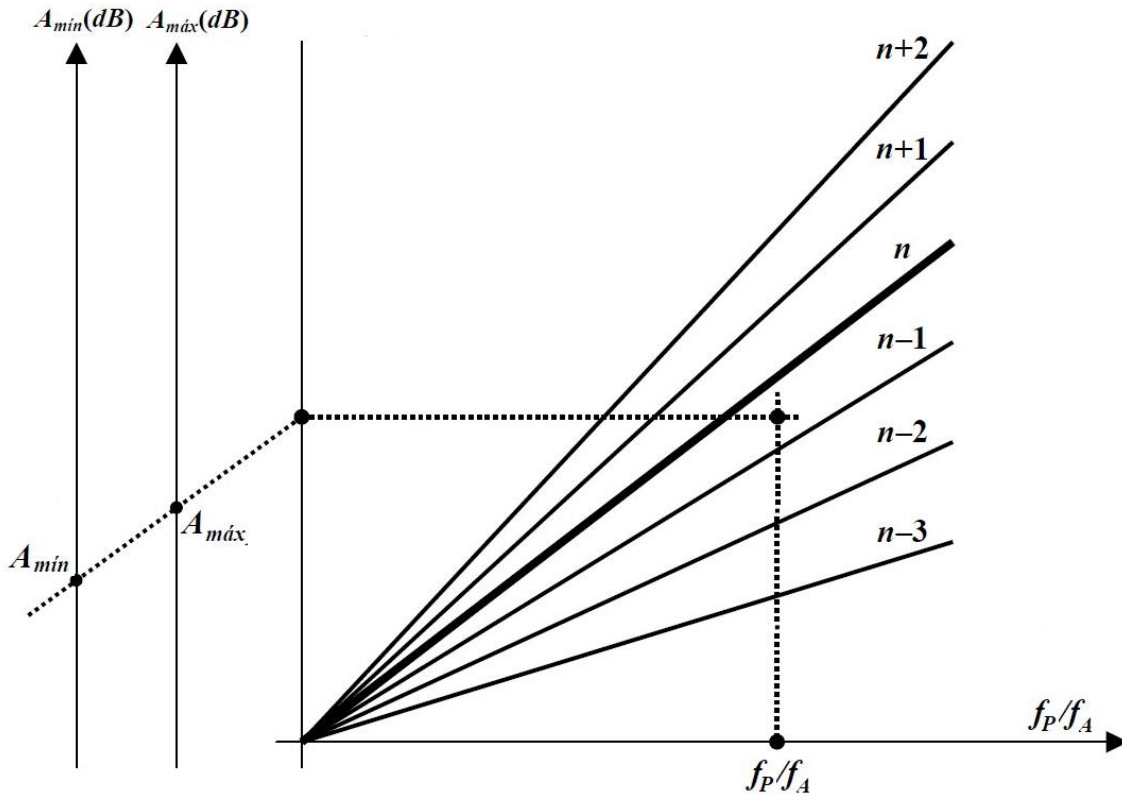


Figura 4.49 - Procediment d'obtenció de l'aproximació per determinar l'ordre en filtres Butterworth (Font: [26]. Apunts EAEIA)

Igual que en el cas anterior, s'utilitzaran els mateixos valors per a determinar la línia vertical de l'àbac, que estarà marcada segons el resultat de l'operació:

$$\frac{f_p}{f_A} = \frac{1500 \text{ Hz}}{500 \text{ Hz}} = 3 \quad (\text{Eq. 4.14})$$

I com a $A_{m\grave{a}x}$ utilitzarem el valor de 30 dB, tal i com s'ha especificat a l'inici d'aquest apartat. Així, traçant les línies corresponents sobre l'àbac podrem obtenir l'ordre necessari per al filtre.

L'àbac que s'utilitza per aquest segon mètode, és el de la figura següent:

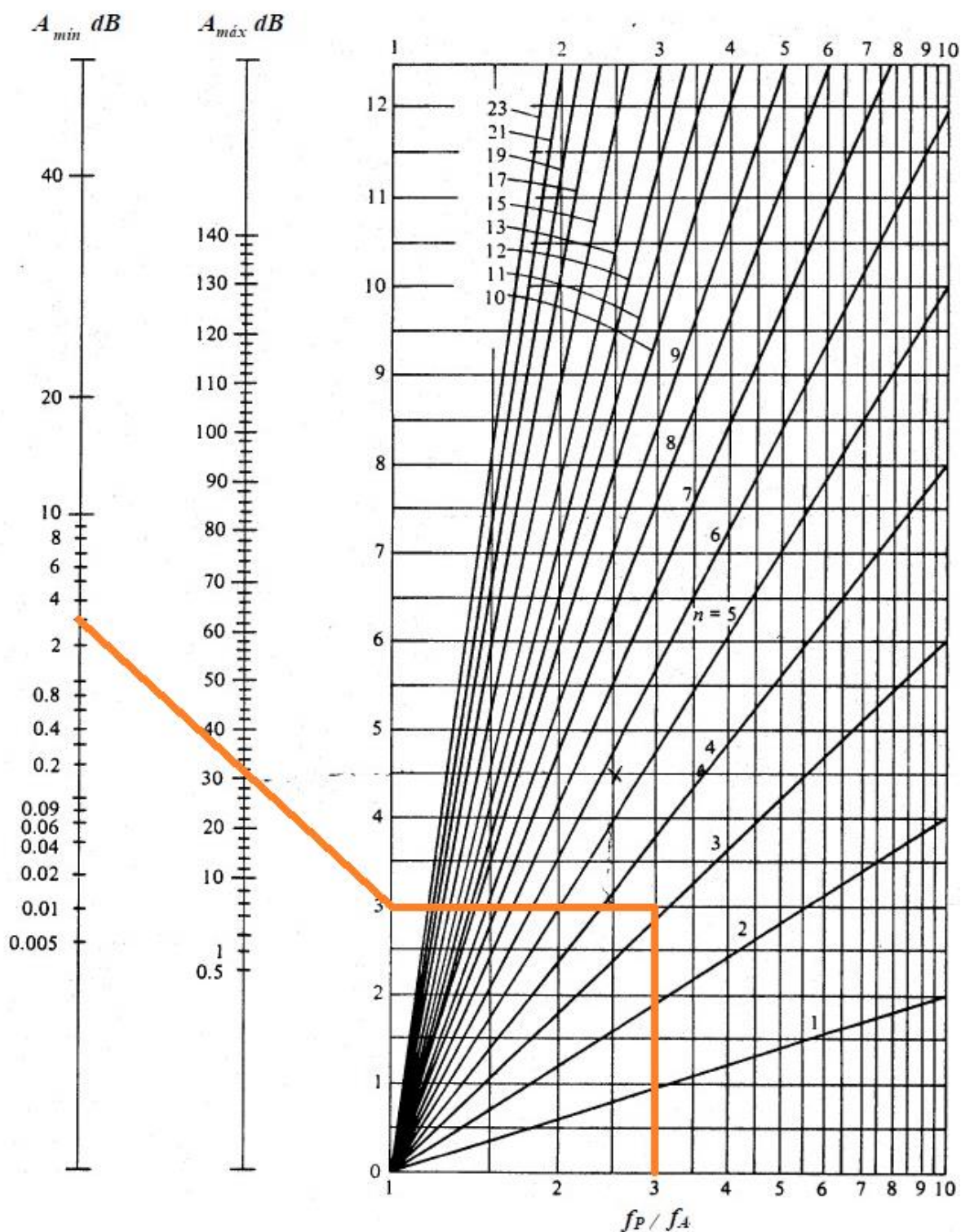


Figura 4.50 - Abac 2 d'aproximació per determinar l'ordre en filtres Butterworth (Font: [26]. Apunts EAEIA)

Un cop trobat l'ordre del filtre necessari, ja podem recórrer a la taula que es mostra a continuació per tal de veure els paràmetres de l'aproximació.

N	CIRCUITO	m	q	V _m	F _m	FUNCION DE TRANSMISION 1/T(S)
2	1	0.7071	1.4142	-	-	$(p^2 + 1.4142p + 1)$
3	1 2	0.5000 1.0000	1.9999	1.15	0.707	$(p^2 + 1.0000p + 1)$ $(p + 1)$
4	1 2	0.9238 0.3826	1.0823 2.6131	- 1.41	- 0.840	$(p^2 + 1.8477p + 1)$ $(p^2 + 0.7653p + 1)$
5	1 2 3	0.8090 0.3090 1.0000	1.2360 3.2360	- 1.70	- 0.899	$(p^2 + 1.6180p + 1)$ $(p^2 + 0.6180p + 1)$ $(p + 1)$
6	1 2 3	0.9659 0.7071 0.2588	1.0352 1.4142 3.8636	- - 1.99	- - 0.930	$(p^2 + 1.9318p + 1)$ $(p^2 + 1.4142p + 1)$ $(p^2 + 0.5176p + 1)$
7	1 2 3 4	0.9009 0.6234 0.2225 1.0000	1.1099 1.6038 4.4939	- 1.02 2.30	- 0.471 0.949	$(p^2 + 1.8019p + 1)$ $(p^2 + 1.2469p + 1)$ $(p^2 + 0.4450p + 1)$ $(p + 1)$
8	1 2 3 4	0.9807 0.8314 0.5555 0.1950	1.0195 1.2026 1.7999 5.1258	- - 1.08 2.61	- - 0.618 0.961	$(p^2 + 1.9615p + 1)$ $(p^2 + 1.6629p + 1)$ $(p^2 + 1.1111p + 1)$ $(p^2 + 0.3901p + 1)$
9	1 2 3 4 5	0.9396 0.7660 0.5000 0.1736 1.0000	1.0641 1.3054 1.9999 5.7587	- - 1.15 2.92	- - 0.707 0.969	$(p^2 + 1.8793p + 1)$ $(p^2 + 1.5320p + 1)$ $(p^2 + 1.0000p + 1)$ $(p^2 + 0.3472p + 1)$ $(p + 1)$

Taula 4.11 - Taula de determinació de paràmetres en filtres Butterworth (Font: [26]. Apunts EAEIA)

Cal recalcar que a la taula, la funció de transmissió equival a la inversa de la funció de transferència normalitzada, el valor V_m és el màxim de la corba de guany i F_m és la freqüència on es troba el màxim d'aquesta corba.

En aquest cas, tal i com s'ha mostrat en apartats anteriors, agafarem les dades pertinents a l'ordre 4, per tant, tindrem els següents valors per cada una de les cel·les que formaran el filtre.

Cel·la1:	m = 0,9238	q = 1,0823	V _m = -----	F _m = -----
Cel·la 2:	m = 0,3826	q = 2,6131	V _m = 1,41	F _m = 0,840

Ara agafem el polinomi corresponent a l'ordre adequat que trobem a la taula de l'aproximació de Butterworth indicada anteriorment.

$$T_{Bu}(s) = (s^2 + 1,8477s + 1) \cdot (s^2 + 0,7653s + 1) \quad (\text{Eq 4.15})$$

$$H_{Bu}(s) = \frac{1}{T_{Bu}(s)} = \frac{1}{(s^2 + 1,8477s + 1) \cdot (s^2 + 0,7653s + 1)} \quad (\text{Eq 4.16})$$

I a partir dels valors anteriors, podem obtenir els paràmetres de cada una de les cel·les del filtre.

$$\omega_{o1} = \frac{1}{\sqrt{m_1 q_1}} = \frac{1}{\sqrt{0,9238 \cdot 1,0823}} \approx 1 \quad (\text{Eq 4.17})$$

Cel·la 1:

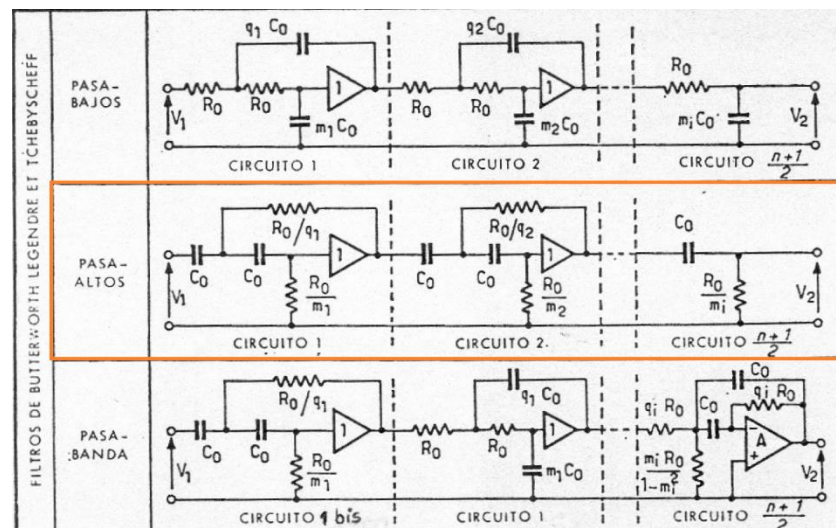
$$Q_1 = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{q_1}{m_1}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1,0823}{0,9238}} = 0,5412 \quad (\text{Eq 4.18})$$

$$\omega_{o2} = \frac{1}{\sqrt{m_2 q_2}} = \frac{1}{\sqrt{0,3826 \cdot 2,6131}} \approx 1 \quad (\text{Eq 4.19}) \quad V_m = 1,41$$

Cel·la 2:

$$Q_2 = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{q_2}{m_2}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{2,6131}{0,3826}} = 1,3067 \quad (\text{Eq 4.20}) \quad F_m = 0,840$$

A continuació, sabem que el filtre a dissenyar, tindrà la forma indicada en la taula que es mostra a la figura de baix:



Taula 4.12 – Taula de determinació de l'estructura dels filtres Butterworth (Font: [26]. Apunts EAEIA)

Aquesta morfologia del filtre, és igual tan per l'aproximació de Legendre i Tchebyscheff com per la de Butterworth.

Ens fixem en l'estructura del filtre passa alts. I sabent les igualtats següents, obtenim els valors dels components que conformen el circuit.

$$\omega_p = \frac{1}{R_0 \cdot C_0} \quad (\text{Eq 4.21})$$

Si suposem un valor de $C_0 = 1 \mu F$, podem obtenir els valors de la resta de components.

$$R_0 = \frac{1}{\omega_p \cdot C_0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot C_0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1500 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 106,1034 \Omega \quad (\text{Eq 4.22})$$

Finalment tenim els valors següents:

$$C_0 = 1 \mu F$$

$$\text{Cel·la 1:} \quad \frac{R_0}{q_1} = \frac{106,1034}{1,0823} = 98,0351 \Omega$$

$$\frac{R_0}{m_1} = \frac{106,1034}{9,9238} = 10,6918 \Omega$$

$$C_0 = 1 \mu F$$

$$\text{Cel·la 2:} \quad \frac{R_0}{q_2} = \frac{106,1034}{2,6131} = 40,6044 \Omega$$

$$\frac{R_0}{m_2} = \frac{106,1034}{0,3826} = 277,3220 \Omega$$

Corresponents als de l'esquema d'aproximació següent:

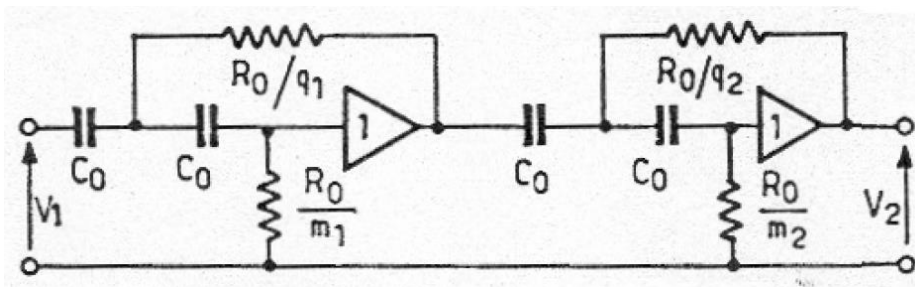


Figura 4.51 - Circuit equivalent filtres Butterworth passa alts (Font: [26]. Apunts EAEIA)

Que si els substituïm, queda un circuit com aquest:

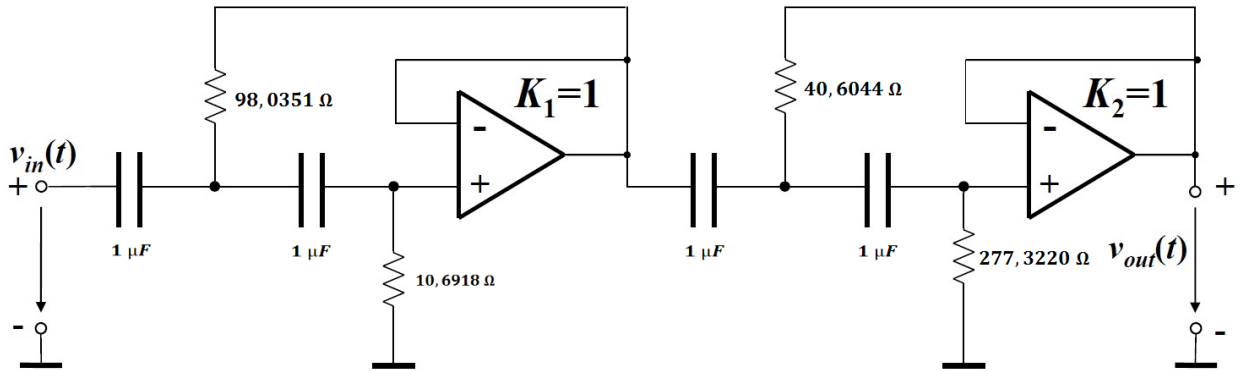


Figura 4.52 - Circuit equivalent filtres Butterworth passa alts amb els valors teòrics

Finalment tenim que:

$$S = \frac{s}{\omega_p} = \frac{s}{2 \cdot \pi \cdot f_p} \quad (\text{Eq 4.23})$$

I per tant substituint a la funció de transferència $H(s)$, ens quedaria el següent:

$$H(s) = \frac{1}{\left[\left(\frac{s}{2 \cdot \pi \cdot 1500} \right)^2 + 1,8477 \left(\frac{s}{2 \cdot \pi \cdot 1500} \right) + 1 \right] \cdot \left[\left(\frac{s}{2 \cdot \pi \cdot 1500} \right)^2 + 0,7653 \left(\frac{s}{2 \cdot \pi \cdot 1500} \right) + 1 \right]} \quad (\text{Eq 4.24})$$

L'últim pas seria fer la normalització dels valors, ja que els obtinguts amb els càlculs anterior no existeixen concretament al mercat, així que s'han de buscar els equivalents més adequats. A la següent taula es poden observar.

Valors teòrics	Valors normalitzats
40,6044 Ω	39 Ω
277,3220 Ω	270 Ω
98,0351 Ω	100 Ω
10,6918 Ω	10 Ω

Taula 4.13 – Normalització dels valors de les resistències

D'aquesta forma, el circuit definitiu del filtre seria el següent:

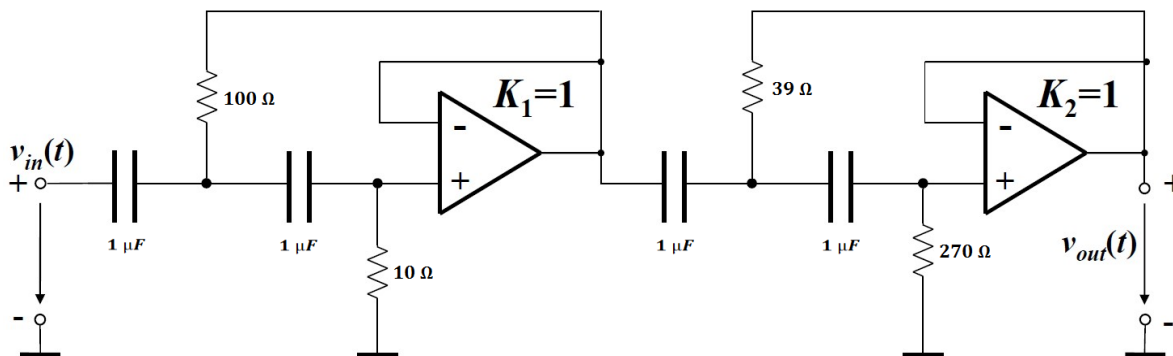


Figura 4.53 - Circuit equivalent filtres Butterworth passa alts amb els valors normalitzats

4.7. Simulacions

Per tal de realitzar les simulacions del filtre dissenyat, s'ha utilitzat el software gratuït FilterPro del fabricant Texas Instruments.

Al ser un software lliure, té les seves limitacions, i una de les quals és que s'ha de triar una única família de resistències i de condensadors per a tots els components, i el programa fa el càlcul automàticament. Aquesta limitació només s'ha vist afectada en una resistència, que enlloc de tenir un valor de 10 ohms, el seu valor ha passat a 120. Aquest fet no afecta massa a la resposta del filtre, així que s'ha depreciat aquesta dada.

A continuació es pot observar el disseny del filtre utilitzat per a realitzar les simulacions:

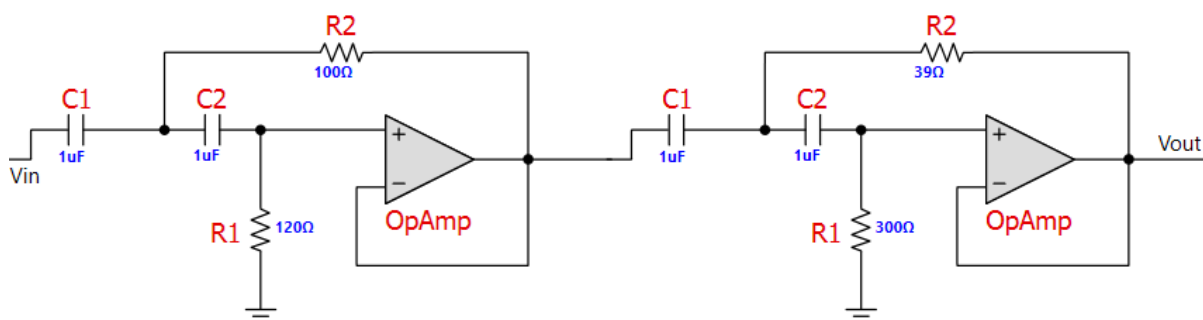


Figura 4.54 - Circuit equivalent del filtre utilitzat en el software FilterPro

I aquestes són les dades introduïdes per a definir les característiques d'aquest.

Filter Stage:	1	Filter Stage:	2
Passband Gain(Ao) :	1	Passband Gain(Ao) :	1
Cutoff Frequency(fn):	1.5 kHz	Cutoff Frequency(fn):	1.5 kHz
QualityFactor (Q):	0.54	QualityFactor (Q):	1.31
Filter Response:	Butterworth	Filter Response:	Butterworth
Circuit Topology:	SallenKey	Circuit Topology:	SallenKey
Min GBW read.:	81 kHz	Min GBW read.:	196.5 kHz

En les següents imatges es pot observar la resposta obtinguda en les simulacions. S'han fet varies captures per tal de tenir una vista més detallada i poder observar la diferència entre la resposta real i l'aproximació.

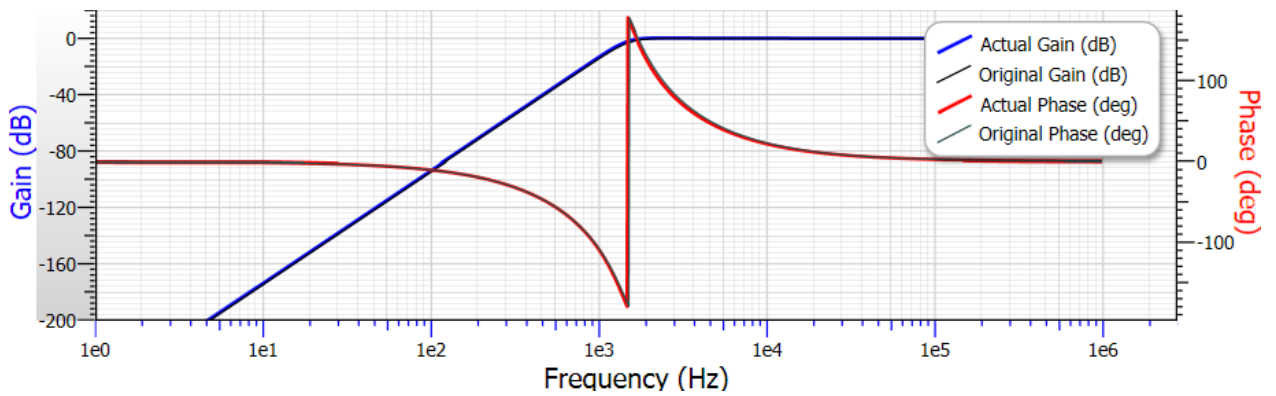


Figura 4.55 - Resposta del filtre dissenyat en el software FilterPro

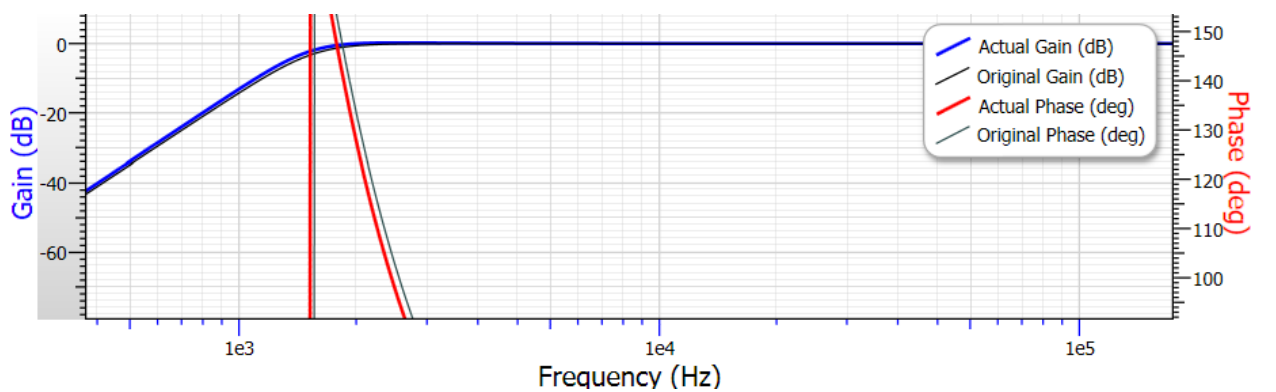


Figura 4.56 - Resposta del filtre dissenyat en el software FilterPro ampliació

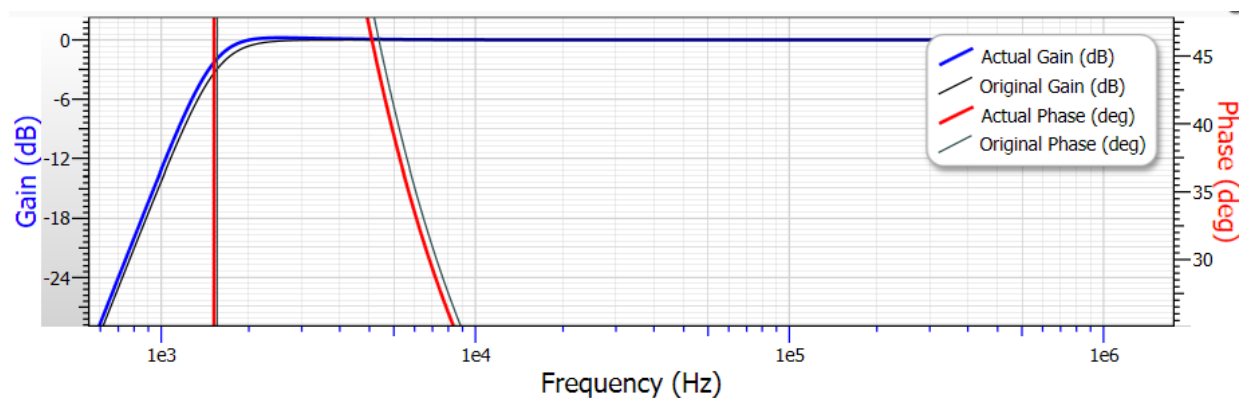


Figura 4.57 - Resposta del filtre dissenyat en el software FilterPro detall

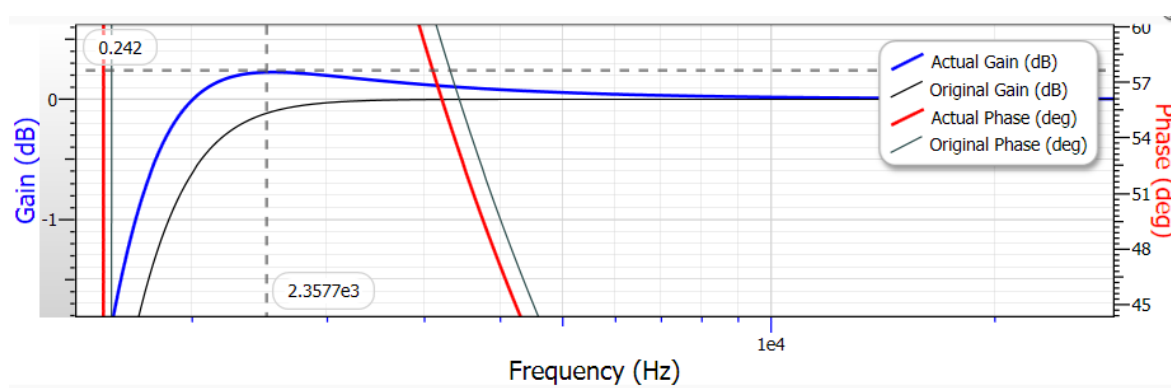


Figura 4.58 - Resposta del filtre dissenyat en el software FilterPro vista detallada

5. Anàlisi de l'impacte ambiental

En aquest projecte, al igual que en la majoria de projectes que es tiren endavant dins de qualsevol empresa, hi ha un petit estudi i una valoració de l'impacte ambiental que suposa l'elaboració d'aquest i les posteriors actuacions. Sí és cert, que en el camp d'aquest treball en qüestió, és força reduït aquest impacte, però tot i això l'objectiu de SITEP S.L. és que els vehicles aeris fabricats causin el mínim efecte sobre el medi ambient.

Existeixen diferents factors ambientals que poden causar un impacte poc desitjat. En primer lloc podríem fer referència a l'efecte que pot tenir el procés de disseny i fabricació d'un VANT. Per analitzar aquestes conseqüències, cal tenir en compte tots els detalls, per petits que siguin, ja sigui dins de l'oficina tècnica, al taller de construcció o en les proves a camp obert.

El primer pas que es dona en un projecte d'aquestes dimensions, és la pluja d'idees amb els corresponents esborranys, ja sigui dibuixats sobre paper en blanc o en una pissarra gran amb guix o retoladors evitant així programari de sketch en un PC que posteriorment s'hauria d'imprimir. Pel que fa a la selecció de components del Dron, es fa mitjançant una recerca a la xarxa i guardant els datasheet en PDF a l'ordinador enlloc de imprimir-los tots, ja que seria un gran plec de folis impresos que suposarien un notable impacte. També es té en compte que els dispositius seleccionats per al dron disposin del distintiu RoHS Compliance, assegurant així que els materials amb que estan fabricats no són perillosos per al medi ambient ni contaminen o són nocius pel que fa a l'exposició ocupacional durant la fabricació i/o el reciclatge.

Per altra banda, el procés de compra d'aquests dispositius s'intenta que sigui el més acurat possible procurant fer el mínim de comandes i així reduir al màxim el transport necessari (que acostuma a ser camions) i les hores dels transportistes. Per exemple, si s'ha de fer una comanda per un nombre reduït d'articles, sabent que l'endemà potser se'n farà una altra, és recomanable esperar a fer les compres conjuntes i així millorem tant de forma econòmica com per al medi ambient. Cal mencionar també que en la majoria d'ocasions els transportistes ja omplen els camions de totes formes, així que es podria no veure afectat per aquest fet, però cal tenir-ho present.

Pel que fa a la construcció dels drones, l'empresa té una política de reutilització de peces per tal de treure el màxim rendiment a tots els dispositius. Posem el cas d'un vehicle accidentat que ha quedat molt malmès per la caiguda, però la controladora de vol ha quedat intacta. En aquest cas, es procedeix amb l'extracció de la controladora i es reaprofitja el un altre VANT, ja sigui com a redundància o com a aparell principal si està en perfectes condicions. Cal tenir en compte que els vehicles aeris són molt delicats en aquest tema, i que qualsevol errada electrònica pot dur a l'accident de l'aeronau. És per

això que abans de reutilitzar qualsevol dispositiu es fan les proves corresponents per assegurar el correcte funcionament i així evitar possibles accidents que podrien causar danys majors per voler estalviar a priori.

Parlant de la problemàtica dels accidents, un dels impactes ambientals que poden causar aquests vehicles, és causat per aquest motiu, i és que en moltes ocasions s'utilitzen en entorns de difícil accés per als humans i si es dona un cas d'accident pot passar que no es puguin accedir a recuperar les peces i quedin en contacte directe amb el sòl.

Pel que fa a la normativa que afecta a la protecció del medi ambient on estan especificades les condicions que han de complir tots els RPAs, és la Disposició 15721 del BOE núm. 316 de 2017 i aquesta fa referència al Reglament (UE) núm. 748/2012 de la Comissió d'agost de 2012, en el qual s'hi estableixen les disposicions de l'aplicació sobre la certificació d'aeronavegabilitat i mediambiental de les aeronaus i els productes, components i equips relacionats a elles.

6. Planificació

En aquest apartat es mostrarà mitjançant un diagrama de Gantt, la planificació que es va dur a terme abans de començar el projecte en qüestió. Tal i com es pot observar el treball es va iniciar a l'empresa el maig del 2017 quan l'estudiant va plantejar a l'empresa la possibilitat de plasmar aquest projecte com a treball de final de grau. Després de la matriculació del projecte, va sortir la idea de la segona part d'aquest, que seria l'estudi de l'àudio.

Les diferents tasques s'han anat realitzant seguint un ordre coherent per tal de fer-ho de la millor manera. En primer lloc es va dur a terme un estudi del mercat, de les diferents topologies i tipus de drones, intentant trobar el que més s'adequava al projecte, i un cop entesa la teoria i preses les decisions corresponents es va continuar amb la selecció dels dispositius.

Pel que fa a la construcció es va realitzar conjuntament amb l'equip tècnic de SITEP S.L. i entre l'acoblament dels diferents dispositius al xassís, l'adaptació dels cables i tot el muntatge en general, va comportar un temps raonable.

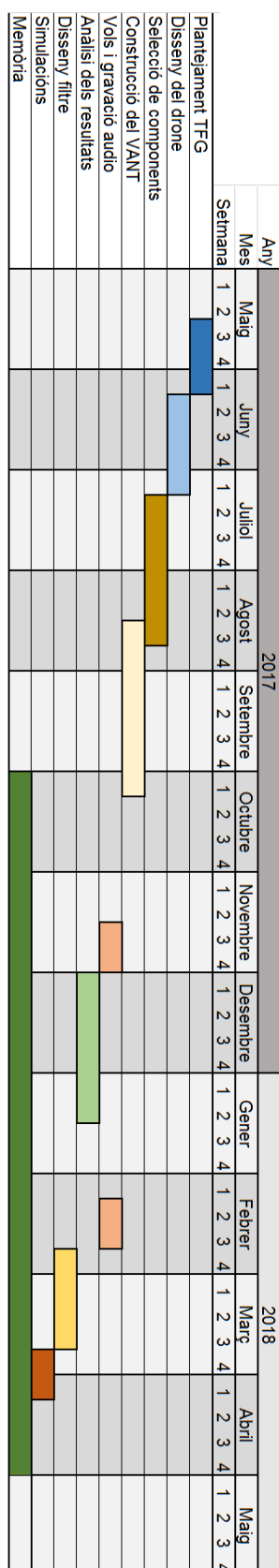
Pel que fa als vols i les gravacions d'àudio, el més complicat era coordinar les jornades per tal que anés bé a tothom i no afectés en l'activitat normal de l'empresa. Es van realitzar dos bancs de proves, els primers per obtenir el màxim de dades possibles, i així poder-les analitzar a posteriori, i els segons per tal de repetir les que no havien sortit bé o millorar els imprevists.

L'anàlisi dels resultats de les proves de vol van ser una tasca costosa al principi, però després era totalment repetitiva a realitzar per a cada una de les gravacions obtingudes.

El disseny del filtre i les simulacions es van realitzar seguint els apunts de l'assignatura d'Electrònica Analògica, complementada amb informació de la xarxa. I el redactat de la memòria s'ha anat duent a terme durant gairebé tot el projecte.

La realització d'aquest projecte ha estat present durant tot un any sencer i amb una dedicació gairebé diària. L'autor també ha estat involucrat en diferents tasques paral·leles dins de l'empresa, no podent dedicar així tot el temps desitjat al projecte i fent-lo prolongar més de l'esperat.

6.1. Diagrama de Gantt



Conclusions

La realització d'aquest projecte, a permès a l'estudiant posar en pràctica tots els coneixements adquirits durant el període de pràctiques en la empresa SITEP S.L., a part d'altres coneixements treballats durant el grau d'enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica com és el cas del disseny de filtres analògics, el software i el llenguatge de programació de MATLAB entre altres.

La combinació dels conceptes apresos en les diferents assignatures i les competències bàsiques han estat la clau per tirar endavant totes les etapes del projecte. En aquest apartat es fa un recull de les conclusions extretes durant la realització del treball descrit anteriorment.

En primer lloc, cal remarcar que alguns dels objectius marcats al plantejament inicial d'aquest projecte, s'han anat modificant durant el transcurs d'aquest, degut a factors que no s'havien tingut en compte a l'hora de fer la previsió i han fet inassequible incorporar-ho en el període de temps marcat.

Un exemple clar seria la descripció del procés de calibratge i programació de la controladora de vol així com el test de motors. Tot i no ser un procés molt complicat, ja que existeixen llibreries i softwares de programació lliure que faciliten molt aquesta tasca, hagués estat interessant afegir un apartat relacionat amb el tema dins el projecte.

Pel que fa a les altres fites marcades des de bon principi, es pot dir que s'han anat complint a la perfecció. Tan el procés de disseny d'un VANT per a tasques de fotogrametria com l'anàlisi de l'àudio gravat i el posterior disseny del filtre corresponent.

Com a conclusions generals de la primera part del projecte, en podem extreure la importància de fer un bon plantejament inicial de l'aplicació per la qual s'està dissenyant el Dron, escollir en primer lloc el payload que s'utilitzarà i fer un bon esquemàtic i càlcul aproximat de tots els dispositius i material necessari per a construir el vehicle aeri. Un cop es té la idea principal i s'han valorat les diferents opcions, ja es pot procedir en l'elecció dels components adequats. És molt important fer-ho de manera ordenada per evitar errors de disseny que es podien haver evitat seguint el procediment descrit en el projecte.

Si parlem de la segona part del projecte, la referent a l'estudi de la gravació d'àudio mitjançant VANTS, podem dir que és un camp força incert i en el que encara no s'ha aprofundit del tot, però els resultats obtinguts durant el projecte són força satisfactoris per l'estudiant. Es poden extreure varies conclusions, però la més important és que a priori, no es tenia clar si seria factible gravar sons des d'una nau d'aquest tipus, i gràcies a l'estudi realitzat podem dir que sí, però dins d'un rang de freqüències determinat. També cal tenir en compte que els resultats obtinguts es poden veure afectats per molts

factors externs i que de ben segur que amb altres condicions d'assaig els resultats variarien d'una forma notable. L'exemple més clar està descrit en el treball, i és que segons el VANT i el mode de vol utilitzat, s'obtenien millors o pitjors gravacions. Així podem assegurar que el mode de vol amb GPS i una distància no massa elevada respecte a la font de so són factors claus per obtenir resultats satisfactoris.

Per altra banda, pel que fa al filtratge de la senyal, s'arriba a varies conclusions, però com a més destacades podem dir que és possible filtrar el soroll dels motors, ja que treballen a freqüències baixes i per tant, al igual que el so de l'aire, es poden eliminar mitjançant un filtre passa alts com el que s'ha dissenyat en el projecte. Aquest fet era el que més preocupava a l'estudiant al plantejar el treball, ja que per experiència pròpia, sabia que els motors emetien un so molt elevat i li semblava impossible poder aïllar aquell so. Gràcies a l'estudi fet, s'ha adonat que estava equivocat i que en realitat és possible filtrar el soroll.

També s'extreu la conclusió de la importància que té aïllar bé la gravadora quan s'embarca al dron, ja que al realitzar les proves estava molt descoberta absorbint així tot l'aire i dificultant la presa de dades. Per a la realització de més proves no es descarta el disseny d'una cúpula en forma de con invertit per tal d'aïllar-la dels factors meteorològics i alhora del propi soroll dels motors.

La realització d'aquest projecte ha permès a l'estudiant aprofundir en una temàtica molt interessant com és el camp dels drons (i encara més amb la importància que està agafant en l'actualitat), aconseguint així entendre a la perfecció els passos a seguir i tot el que s'ha de contemplar a l'hora de dissenyar-ne un segons l'aplicació a la que estigui destinat. A més s'han adquirit uns nivells de coneixement en el camp de l'àudio i filtratge de senyals que resulten molt interessants i fins al moment eren força desconeguts per l'autor d'aquest treball.

Com a possibles millores per aquest projecte, tal i com s'ha comentat amb anterioritat, resultaria interessant descriure el procés de calibratge i programació de la controladora de vol, a més d'incidir en tot el post procés, és a dir, la programació i l'execució dels vols seguit de l'anàlisi i posterior processat de les imatges per aconseguir els aixecaments en 3D. D'aquesta manera quedaria el projecte complert i es veuria més l'aplicació real de la fotogrametria. D'altra banda, pel que fa a l'apartat de l'àudio, hagués estat molt bé poder construir físicament el filtre en una PCB, soldar-li els components i embarcar-lo al dron directament amb la gravadora per a poder realitzar el filtratge a temps real.

Malauradament aquest procés implica moltíssima feina extra que amb el temps estipulat per a la realització dels Projectes de final de Grau resulta impossible.

Pressupost i/o Anàlisi Econòmica

En aquest apartat es farà un resum detallat de tots els costos que implica la realització d'aquest projecte, tenint en compte tots els mitjans emprats, els materials utilitzats i fent una valoració econòmica dels mateixos.

S'ha de tenir en compte que els costos estan valorats a nivell de prototipus, en cas que es volgués fer una fabricació en sèrie de drons idèntics, el cost de les peces s'abaratiria molt més ja que al ser quantitats elevades es poden aconseguir millors preus per part dels proveïdors.

El pressupost està desglossat en tres seccions diferents. Per una banda, els costos d'enginyeria, que impliquen el temps de disseny, selecció de dispositius i muntatge, per altra banda el cost dels propis materials i dispositius que formen part del dron, i finalment els costos indirectes.

Costos d'enginyeria

Els costos d'enginyeria, reflecteixen totes les tasques realitzades durant el projecte i el cost que té cada una d'elles. Segons el nivell de complexitat de les tasques, aquestes tindran un preu per hora mes elevat o menys.

Tasques	Hores	€/h	Preu (€)
Estudi de la implementació del projecte	180	18	3240,00
Disseny hardware	55	22	1.210,00
Muntatge Hardware	80	22	1.760,00
Proves funcionals a camp	70	25	1.750,00
Anàlisi de dades	170	18	3.060,00
Confecció de la documentació	200	15	3.000,00
TOTAL:	755 h		14.020,00 €

Taula – Especificació costos d'enginyeria

Costos de material

Els costos de material reflecteixen el preu de totes les parts que conformen el dron i els dispositius embarcats.

Referència	Descripció	Unitats	Preu/Unitat	Preu (€)
Xassís	Cos del dron	1	2500,00	2500,00
Sistema propulsor	Motor	8	122,00	976,00
	Hèlix (2 x Pack)	4	83,00	332,00
Electrònica	PDB	1	193,00	193,00
	ESC	8	105,00	840
	Controladora	1	238,00	238,00
	Antena GPS	2	35,00	70,00
Alimentació	Bateria	2	429,00	858,00
Comunicacions	Emissora	1	168,00	168,00
	Transmissor-receptor Telemetria	1	28,00	28,00
	Receptor Emissora	1	26,00	26,00
Altres	Cables AWG 14	2	13,00	26,00
TOTAL:				6.255,00 €

Taula – Especificació costos de material

Costos indirectes

Els costos indirectes inclouen les despeses del projecte que no s'han tingut en compte en els costos d'enginyeria a priori però que suposen un percentatge del total d'aquest. Es veuen reflectits en aquesta taula:

Concepte	% Costos d'enginyeria	Preu (€)
Dietes i desplaçaments	5,00	701,00
Material d'oficina, informàtic i enquadernació	2,00	280,40
TOTAL:	630 h	981,40 €

Taula – Especificació costos indirectes

Costos totals

Finalment es descriuen els costos totals aplicant-hi el 21% d'I.V.A corresponent.

Mòdul	Preu (€)
Costos d'enginyeria	14.020,00
Costos de material	6255,00
Costos indirectes	981,40
Total	21.256,40 €
I.V.A (21%)	4.463,84
Total amb I.V.A	25.720,24 €

Taula – Especificació costos totals

Bibliografia

- [1]. AGC DRONE. *Operadora de drones*. [en linea]. 2018. [Consulta: 11 abril de 2018]. Disponible a:
<<http://www.acgdrone.com/>>
- [2]. RC AVIONES. *Fotos de Amigos*. [en linea]. 2018. [Consulta: 11 abril de 2018]. Disponible a:
<<http://www.rcaviones.com.ar/fotos-de-amigos.html>>
- [3]. MUNDO DRON. *Fotos i videos de vuestros drones*. [en linea]. 4 abril 2018. [Consulta: 7 octubre de 2017]. Disponible a: <<https://foro.mundodron.net/forum/fotos-y-videos-hechos-con-drones>>
- [4]. FEIYUTECH. *UAV*. [en linea]. 2018. [Consulta: 11 abril de 2018]. Disponible a:
<<http://www.feiyu-tech.com/uav/>>
- [5]. ALIEXPRESS. *Camera Drones*. [en linea]. 2018. [Consulta: 11 abril de 2018]. Disponible a:
<<https://es.aliexpress.com/w/wholesale-uav.html>>
- [6]. DRONE FORUM. *Other drones and copters*. [en linea]. 24 març 2018. [Consulta: 12 novembre de 2017]. Disponible a:
<<https://www.drone-forum.com/forum/viewforum.php?f=111&sid=24580ac997b0039ce79454d-ac1def49b>>
- [7]. ALIBABA. *Juguetes de control remoto*. [en linea]. 2018. [Consulta: 11 abril de 2018]. Disponible a:
<<http://spanish.alibaba.com/product-list/drone/pid2616--drone-----SIZE50--GALLERY.html?spm=a2700.8698675.12.2.13c074861K0tij>>
- [8]. AVIATION WEEK NETWORK. *Combat aircraft*. [en linea]. 2018. [Consulta: 12 novembre de 2017]. Disponible a: <<http://aviationweek.com/defense/combat-aircraft-0>>
- [9]. PINTEREST. *Drone*. [en linea]. 2018. [Consulta: 11 abril de 2018]. Disponible a:
<[https://www.pinterest.es/search/pins/?q=drone&rs=typed&term_meta\[\]=drone%7Ctyped](https://www.pinterest.es/search/pins/?q=drone&rs=typed&term_meta[]=drone%7Ctyped)>
- [10]. XDRONES. *Photo gallery*. [en linea]. 2018. [Consulta: 14 novembre de 2017]. Disponible a:
<<http://www.xdrones.com/>>

- [11]. EPHOTOZINE. *Sony*. [en linea]. 2018. [Consulta: 11 abril de 2018]. Disponible a:
<<https://www.ephotozine.com/site-search/sony>>
- [12]. GREMSY. *Gremsy H7*. [en linea]. 2018. [Consulta: 2 desembre de 2017]. Disponible a:
<<https://gremsy.com/gremsy-h7/>>
- [13]. GRYPHON DYNAMICS. *X8 Airframe Kit V2 – XQ 800V*. [en linea]. 2018. [Consulta: 4 desembre de 2017]. Disponible a: <<http://gryphondynamics.co.kr/product/x8-airframe-kit-new-version>>
- [14]. AMAZONE. *Juguetes y juegos: drones*. [en linea]. 2018. [Consulta: 4 desembre de 2017].
Disponible a:
<https://www.amazon.es/s/ref=sr_nr_n_1?fst=as%3Aoff&rh=n%3A599385031%2Cn%3A14525755031%2Ck%3Adrone&keywords=drone&ie=UTF8&qid=1523892933&rnid=599386031>
- [15]. T-MOTOR. *U7-V2.0 KV490*. [en linea]. 2018. [Consulta: 4 desembre de 2017]. Disponible a:
<<http://store-en.tmotor.com/goods.php?id=321>>
- [16]. AIRCRAFT. *ESC para Multicopteros*. [en linea]. 2018. [Consulta: 5 abril de 2018]. Disponible a:
<<https://www.aircraft-japan.com/ja/multirotor/multirotor-accy/multirotor-esc>>
- [17]. DRONE ZONE MADRID. *Drone avanzado*. [en linea]. 2018. [Consulta: 9 gener de 2018]. Disponible a: <<http://dronezonemadrid.es/productos/sroneavanzado/sroneavanzado>>
- [18]. JDRONES. *Produts*. [en linea]. 2016. [Consulta: 5 abril de 2018]. Disponible a:
<<http://www.jdrones.com/products-landing.html>>
- [19]. HOBBY KING. *Flight controllers & Accessories*. [en linea]. 2018. [Consulta: 9 gener de 2018].
Disponible a: <https://hobbyking.com/en_us/drones/flight-controllers.html>
- [20]. DESERT AIRCRAFT. *Product collection*. [en linea]. 2018. [Consulta: 10 gener de 2018]. Disponible a: <<https://www.desertaircraft.com/collections>>
- [21]. OLYMPUS. *Audio Systems VN-741PC*. [en linea]. Juliol de 2016. [Consulta: març de 2018].
Disponible a:
<https://www.olympus.es/site/es/a/audio_systems/audio_recording/notetakers/vn_741pc/index.pdf>

[22]. FADU. *Acondicionamiento acustico – Temas teoricos*. [en linea]. 2007. [Consulta: 5 abril de 2018]. Disponible a:

<<http://www.fadu.edu.uy/acondicionamiento-acustico/wp-content/blogs.dir/27/files/2012/02/03-FUENTES-SONORAS.pdf>>

[23]. CENTRO AUDITIVO CUENCA. *Sonido directo, reverberacion y distancia crítica*. [en linea]. 2018. [Consulta: 5 abril de 2018]. Disponible a:

<<https://www.centroauditivo-valencia.es/audio-blog/ac%C3%Bastica/>>

[24]. GOOGLE. *Imagenes*. [en linea]. 2018. [Consulta: 5 abril de 2018]. Disponible a:

<<https://www.google.es/>>

[25]. Herminio Martínez. “Parte_I Introduccion y Sallen Key”. Disponible a:

<<http://atenea.upc.edu>>

[26]. Herminio Martínez. “Parte IV Galibos”. Disponible a:

<<http://atenea.upc.edu>>

[27]. Herminio Martínez. “Parte III Funciones de aproximacion”. Disponible a:

<<http://atenea.upc.edu>>

[28]. SHURE Legendary Performance. *Microfonos: Patrones polares / direccionalidad*. [en linea]. 10 maig de 2012 [Consulta: 12 març de 2018]. Disponible a:

<http://www.shure.es/asistencia_descargas/contenido-educativo/microfonos/microphone_polar_patterns>

[29]. Universidad de Alcalà. *Teoria de la senyal i las comunicaciones – Tipos de filtros*. [en linea]. 2018. [Consulta: 16 març de 2018]. Disponible a:

< http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/ittse/asc/apuntes/Trans_TiposFiltros.pdf>

[30]. Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. *Disposicion 15721*. [en linea] [Consulta: 29 desembre de 2017]. Disponible a: < <https://www.boe.es/boe/dias/2017/12/29/pdfs/BOE-A-2017-15721.pdf>>

[31]. Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. *Reglamento (UE) nº. 748*. [en linea]. 3 agost de 2012 [Consulta: 18 setembre de 2017]. Disponible a:

<<https://www.boe.es/doue/2012/224/L00001-00085.pdf>>

[32]. Drone Casero. *APM vs NAZA*. [en linea]. 2017. [Consulta: 15 agost de 2017]. Disponible a:
<<http://dronecasero.blogspot.com.es/2015/07/drones-para-cetreria-evolucionando-el.html>>

[33]. RCTECNIC. *Drones*. [en linea]. 2018. [Consulta: 18 setembre de 2017]. Disponible a:
<<https://www.rctecnic.com/327-drones?p=5>>

Annexos

Espectres de freqüències extrets de les gravacions d'àudio

Dron Mitjà (DM):

- 5 m d'alçada

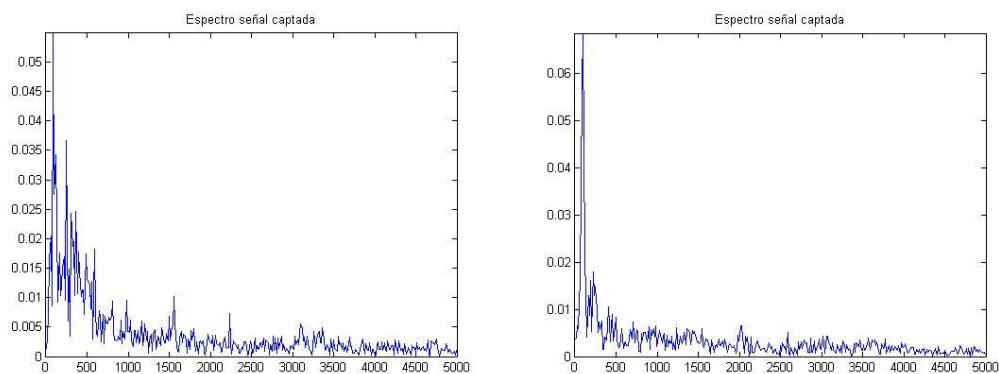


Figura A1 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 500 (figura de l'esquerra) i 1000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

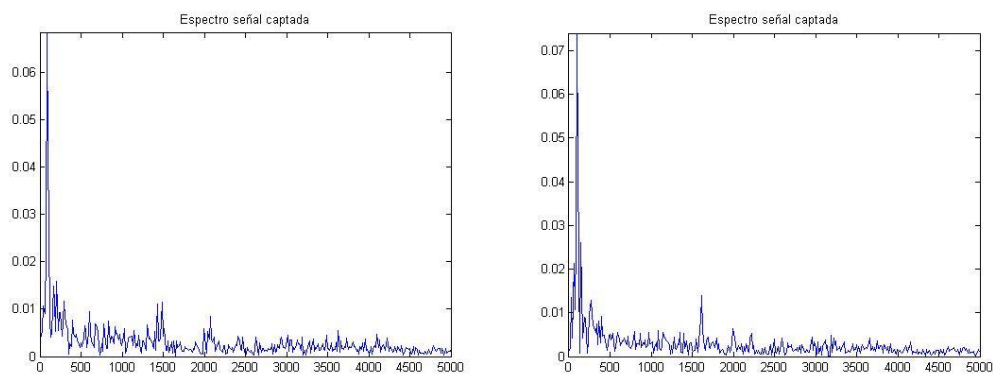


Figura A2 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 1500 (figura de l'esquerra) i 2000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

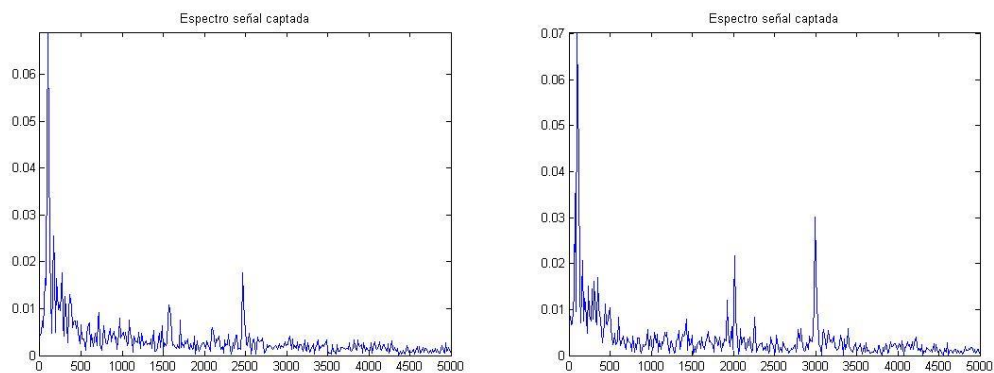


Figura A31 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 2500 (figura de l'esquerra) i 3000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

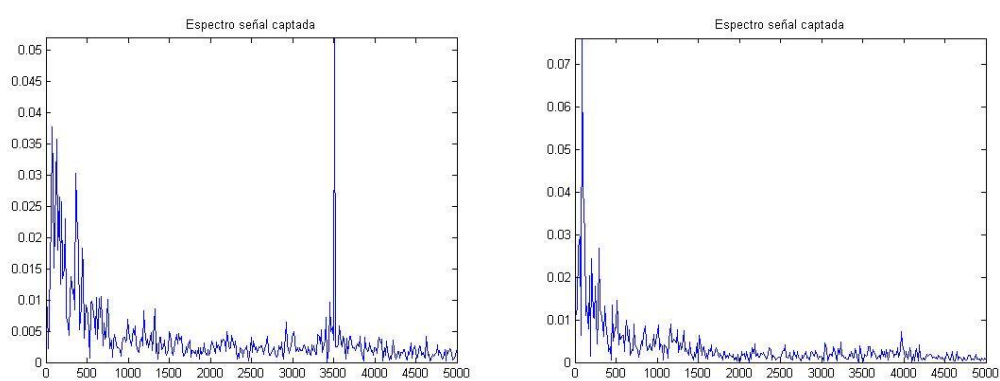


Figura A4 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 3500 (figura de l'esquerra) i 4000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

- 10 m d'alçada

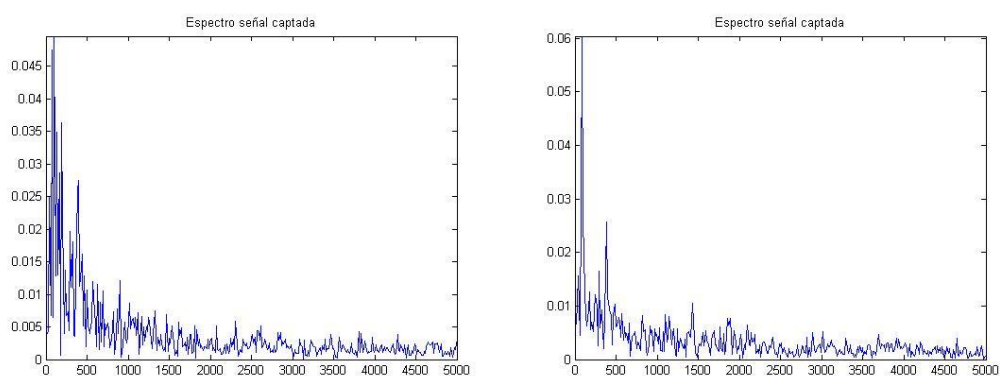


Figura A5 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 500 (figura de l'esquerra) i 1000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

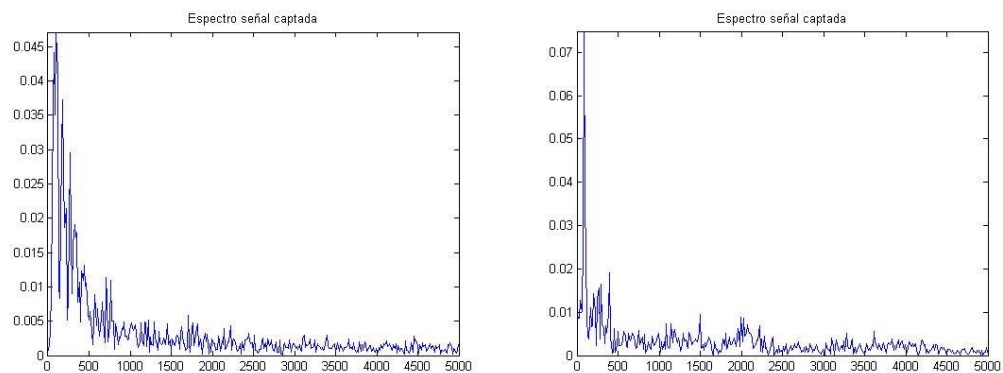


Figura A6 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 1500 (figura de l'esquerra) i 2000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

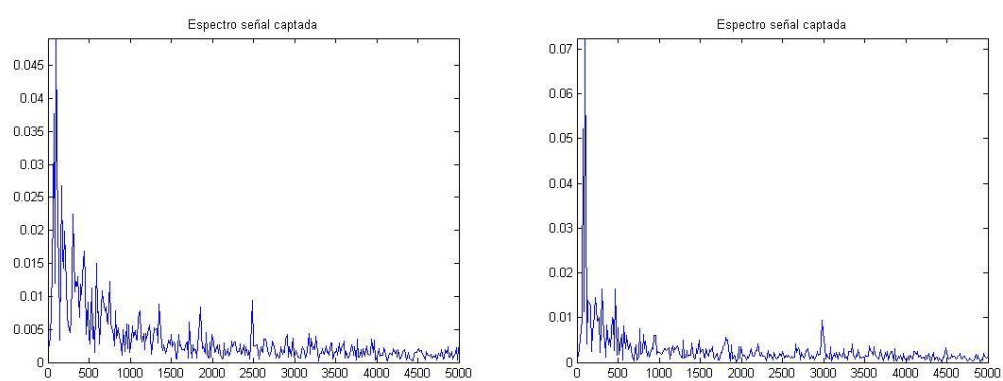


Figura A7 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 2500 (figura de l'esquerra) i 3000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

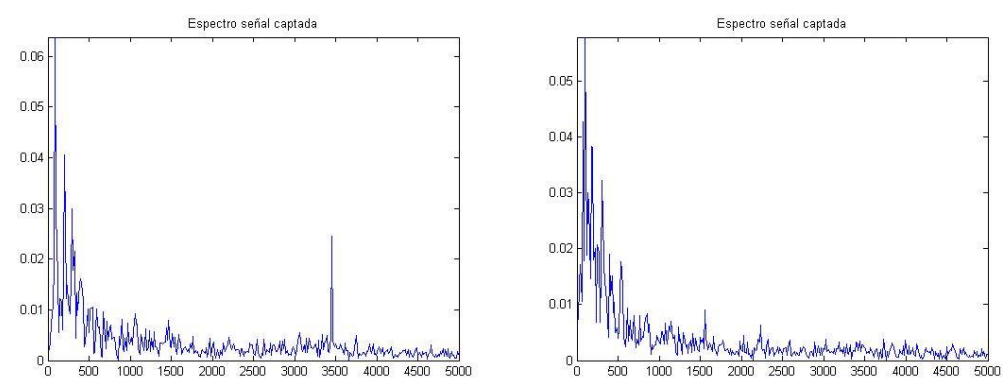


Figura A8 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 3500 (figura de l'esquerra) i 4000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

- 20 m d'alçada

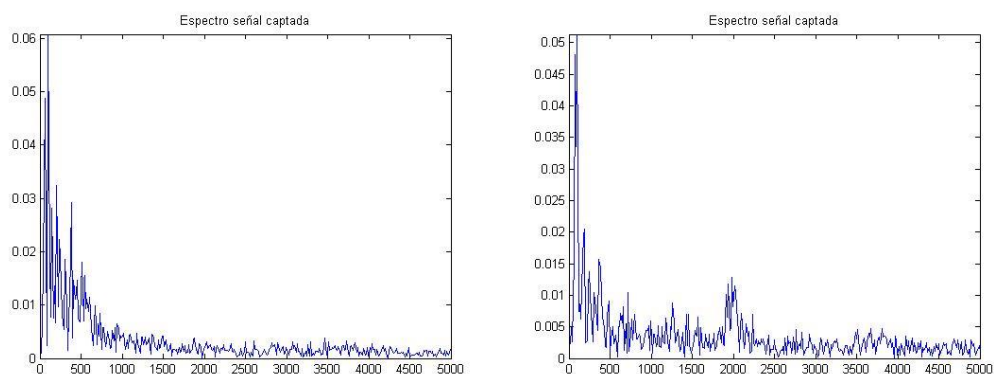


Figura A9 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 500 (figura de l'esquerra) i 1000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

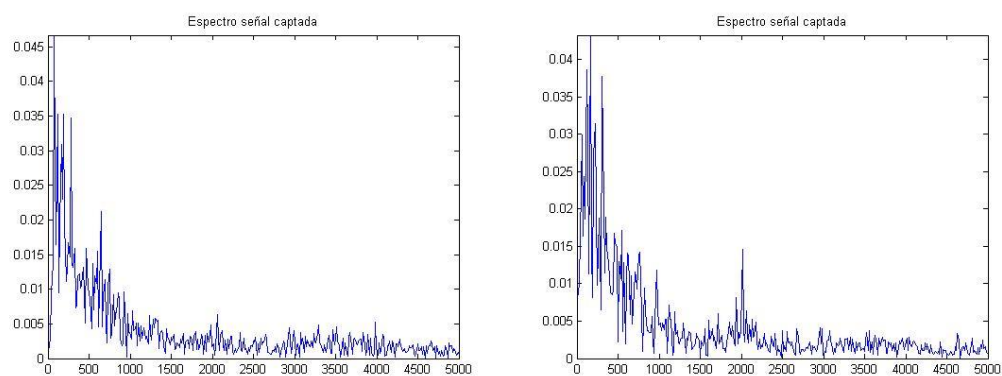


Figura A10 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 1500 (figura de l'esquerra) i 2000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

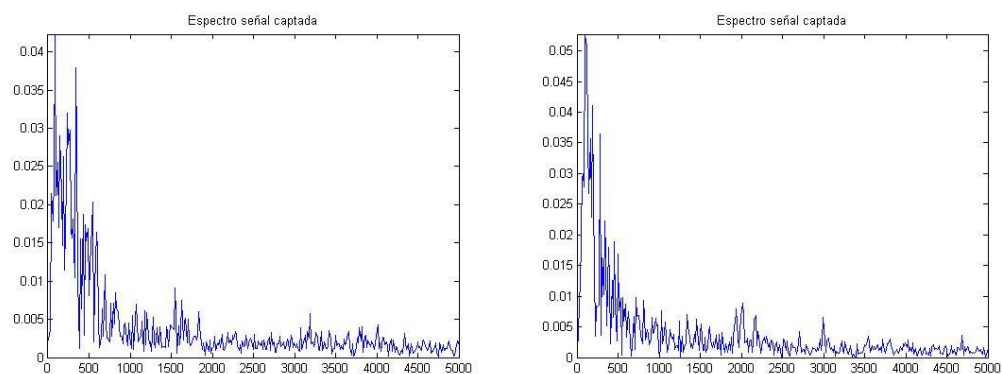


Figura A11 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 2500 (figura de l'esquerra) i 3000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

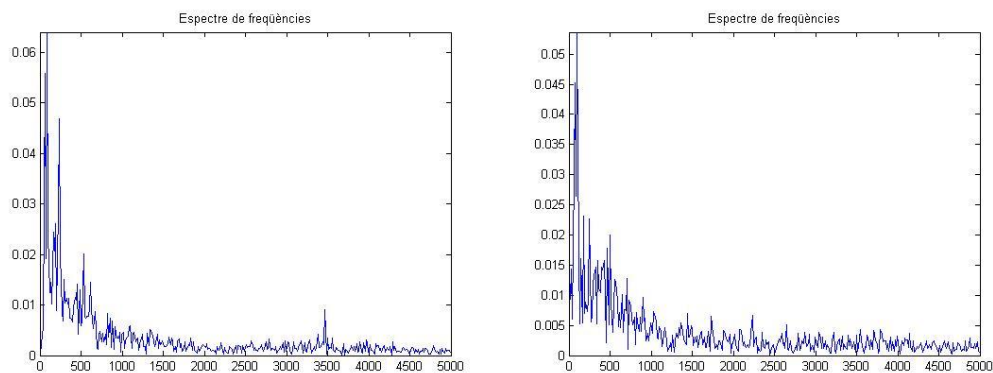


Figura A12 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 3500 (figura de l'esquerra) i 4000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

Dron Petit (DP):

- 5 m d'alçada

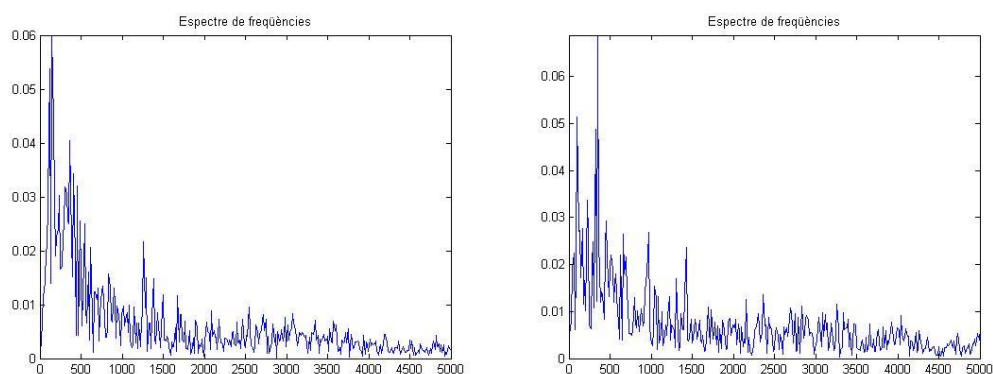


Figura A13 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 500 (figura de l'esquerra) i 1000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

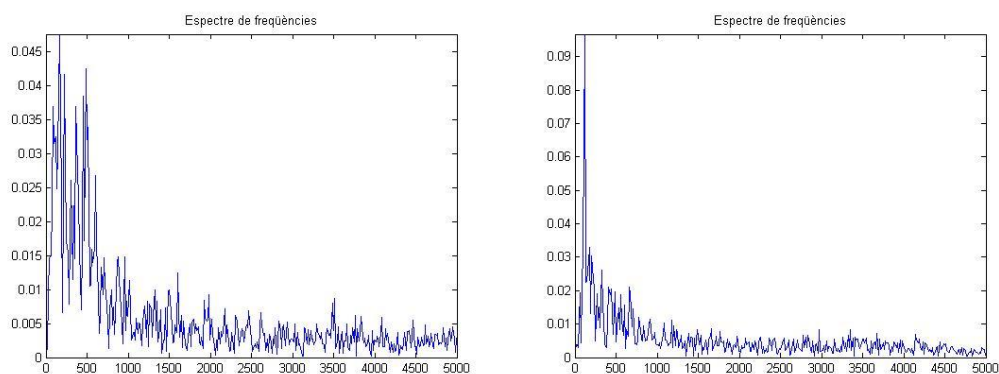


Figura A14 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 1500 (figura de l'esquerra) i 2000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

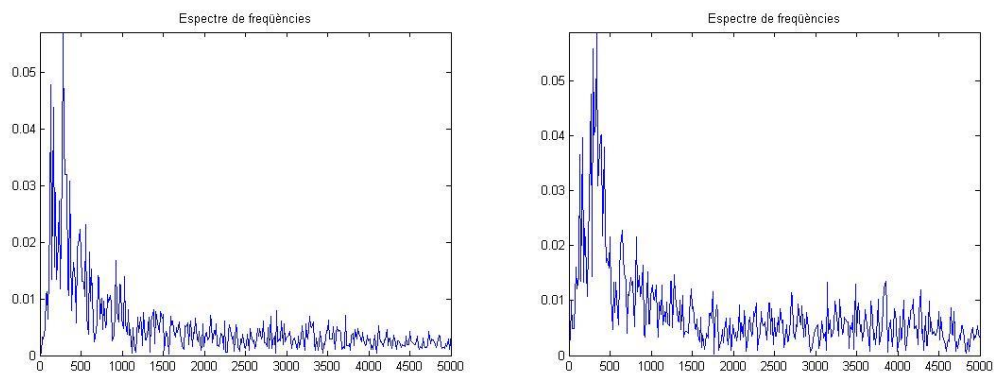


Figura A15 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 2500 (figura de l'esquerra) i 3000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

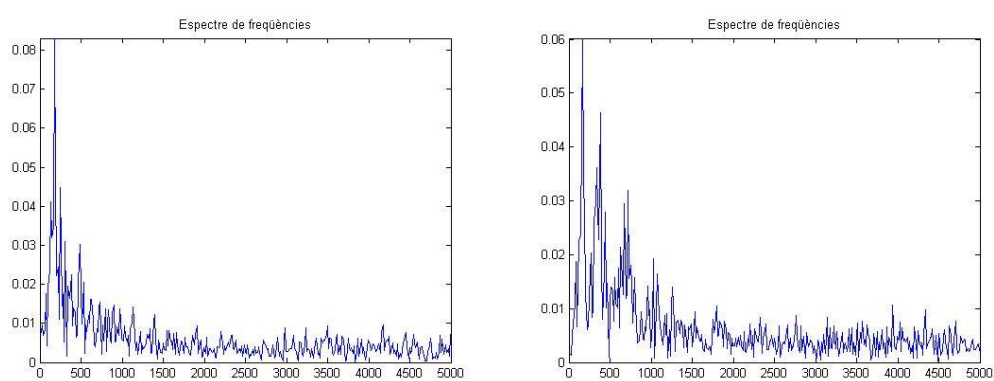


Figura A16 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 3500 (figura de l'esquerra) i 4000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

- 10 m d'alçada

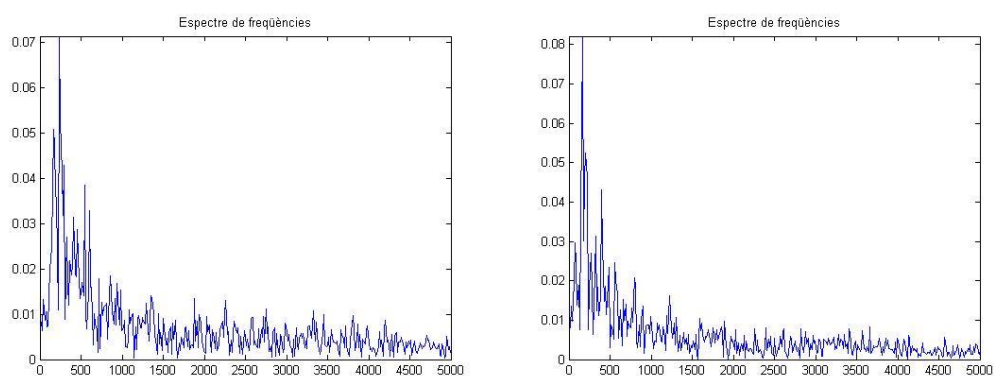


Figura A17 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 500 (figura de l'esquerra) i 1000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

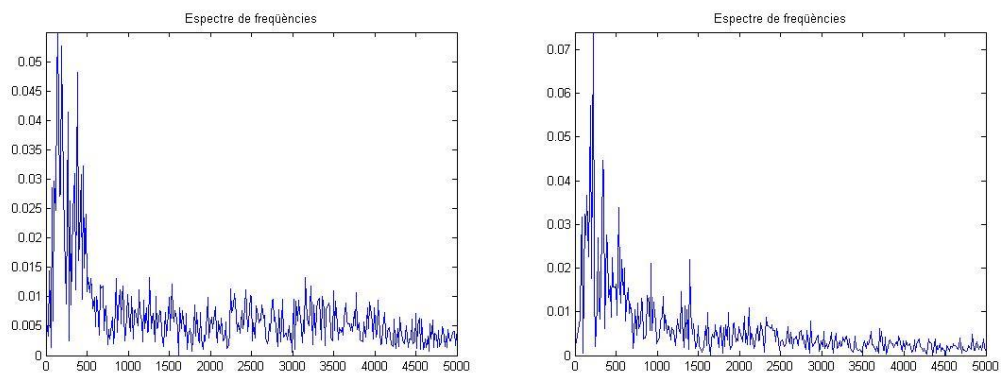


Figura A18 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 1500 (figura de l'esquerra) i 2000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

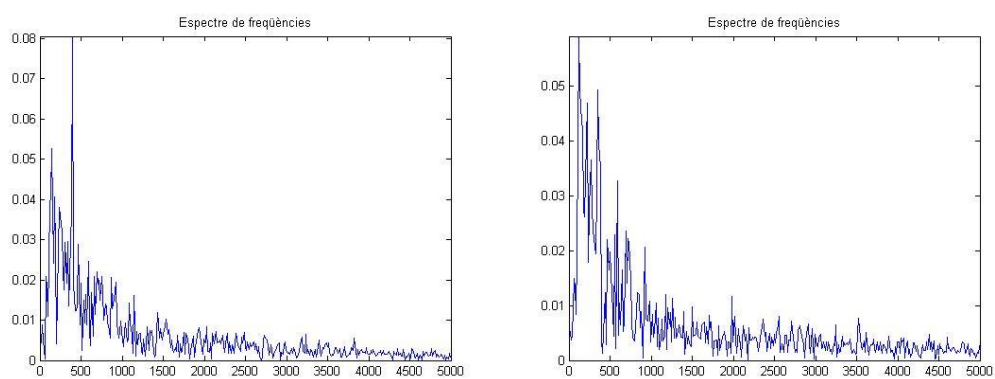


Figura A19 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 2500 (figura de l'esquerra) i 3000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

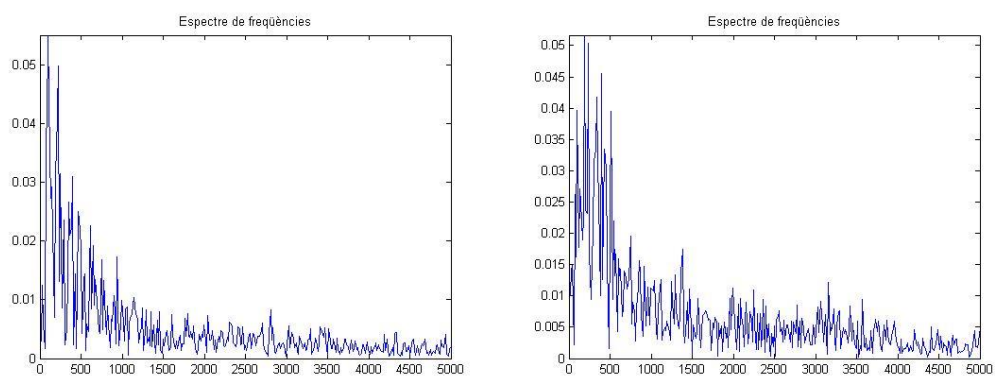


Figura A20 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 3500 (figura de l'esquerra) i 4000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

- 20 m d'alçada

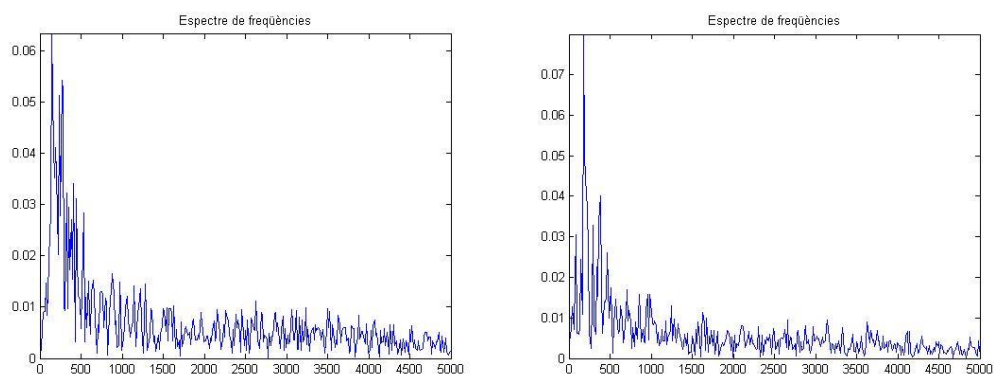


Figura A21 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 500 (figura de l'esquerra) i 1000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

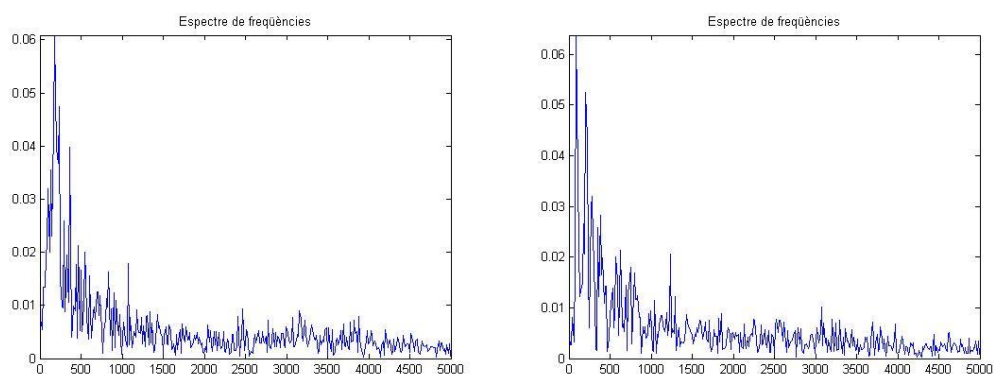


Figura A22 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 1500 (figura de l'esquerra) i 2000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

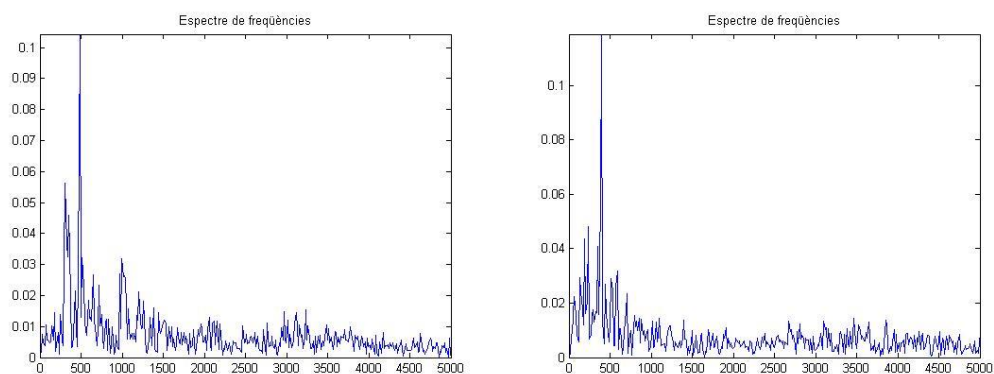


Figura A23 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 2500 (figura de l'esquerra) i 3000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

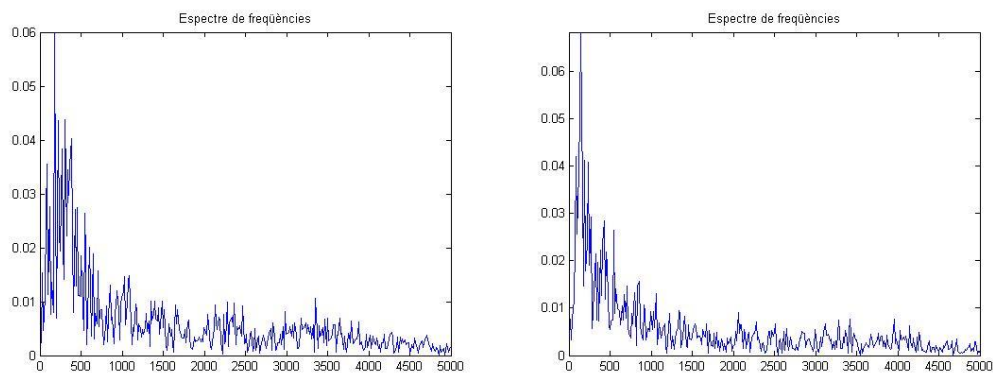


Figura A24 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 3500 (figura de l'esquerra) i 4000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

Dron Gran (s1000):

- 5 m d'alçada

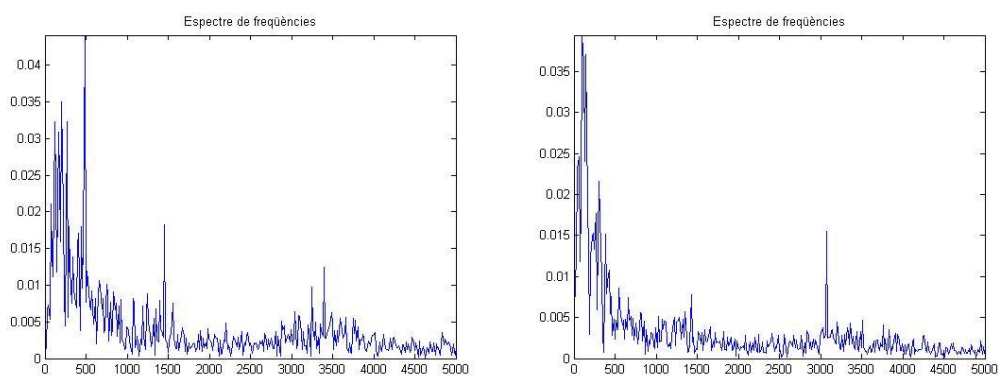


Figura A25 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 500 (figura de l'esquerra) i 1000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

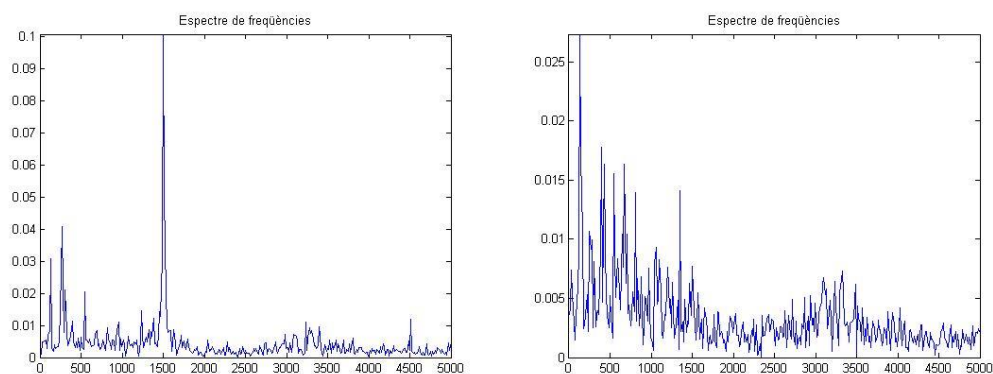


Figura A26 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 1500 (figura de l'esquerra) i 2000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

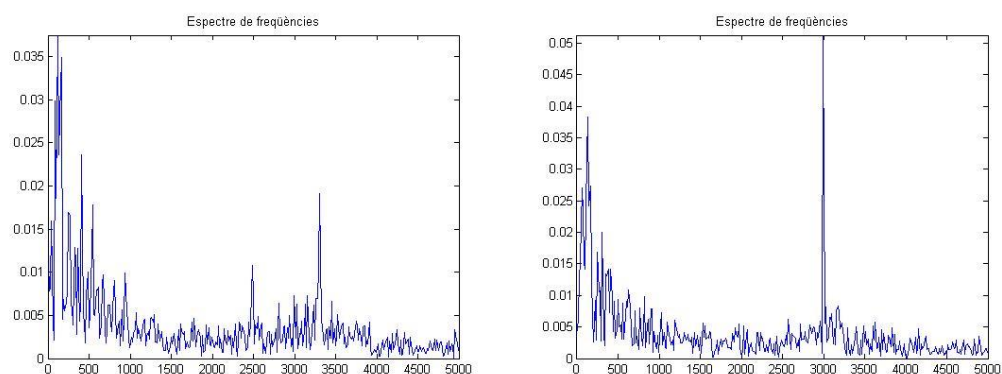


Figura A27 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 2500 (figura de l'esquerra) i 3000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

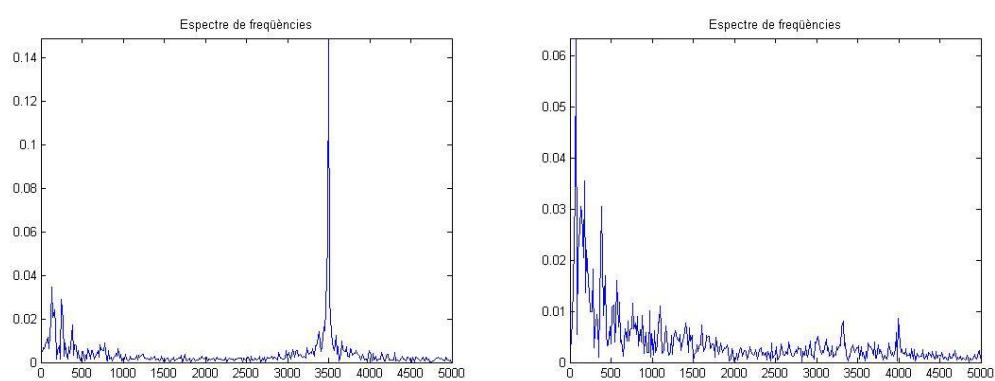


Figura A28 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 3500 (figura de l'esquerra) i 4000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

- 10 m d'alçada

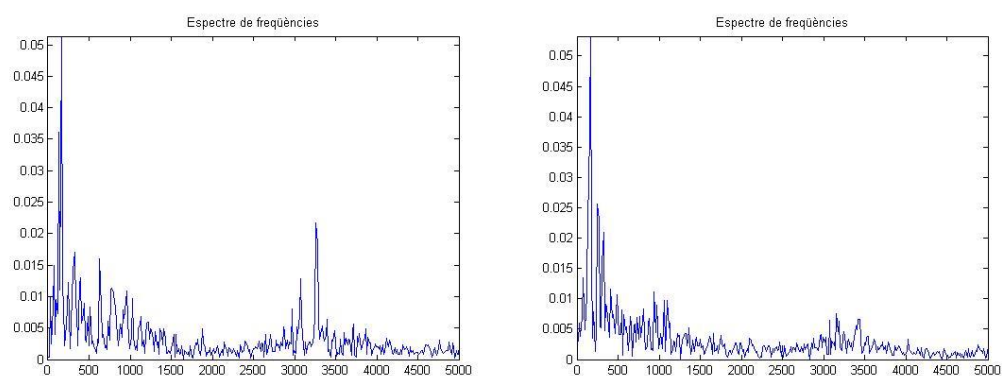


Figura A29 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 500 (figura de l'esquerra) i 1000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

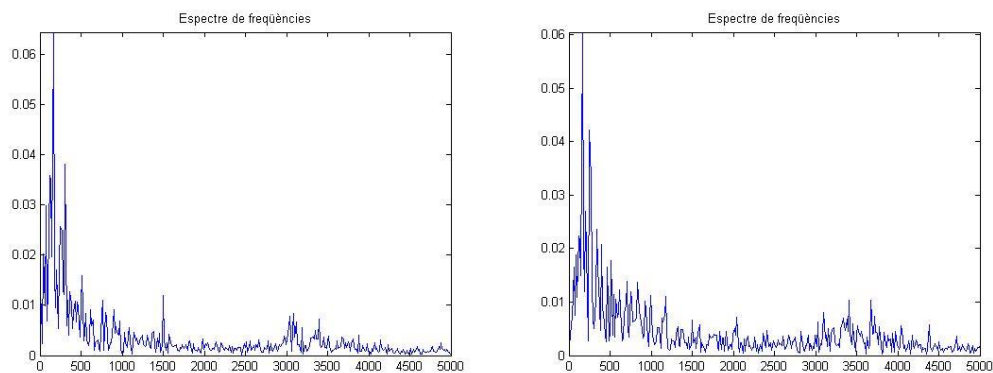


Figura A30 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 1500 (figura de l'esquerra) i 2000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

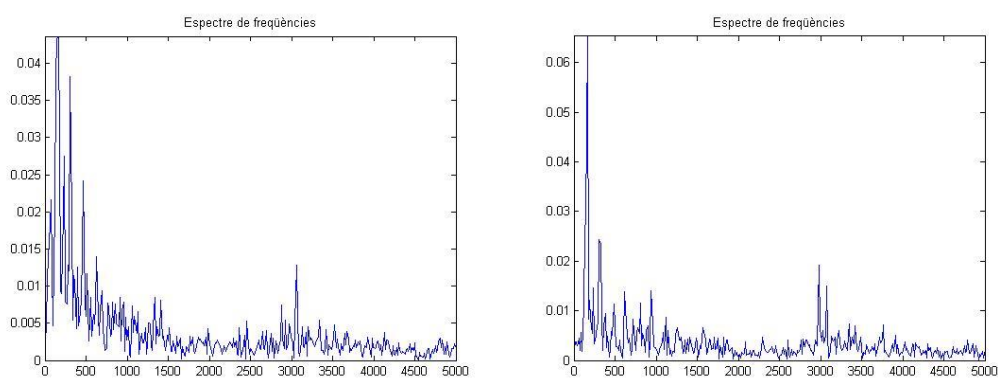


Figura A31 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 2500 (figura de l'esquerra) i 3000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

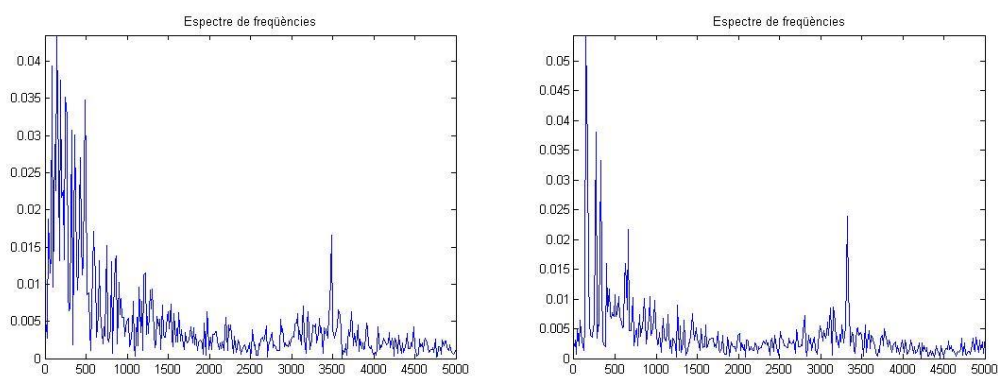


Figura A32 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 3500 (figura de l'esquerra) i 4000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

- 20 m d'alçada

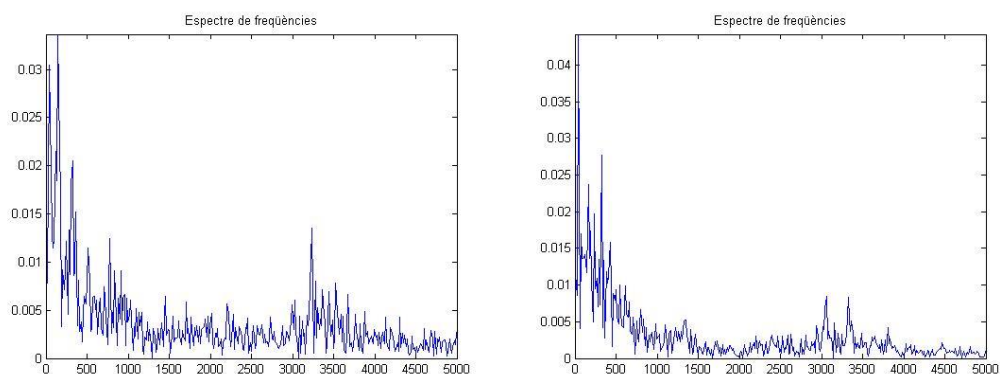


Figura A33 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 500 (figura de l'esquerra) i 1000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

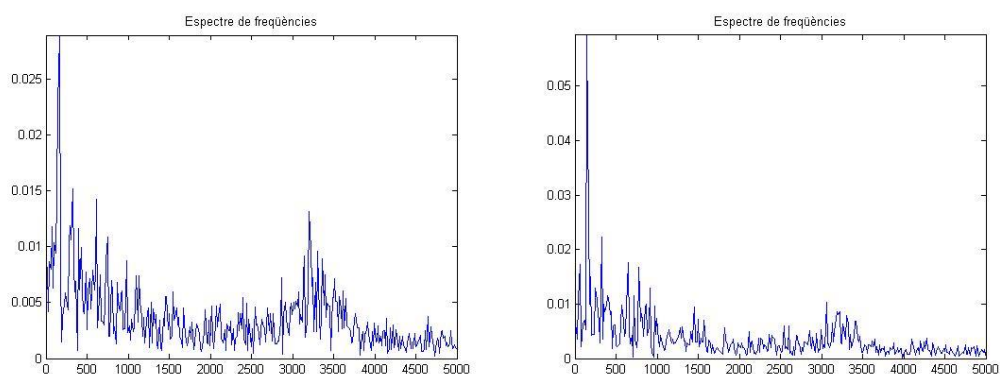


Figura A34 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 1500 (figura de l'esquerra) i 2000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

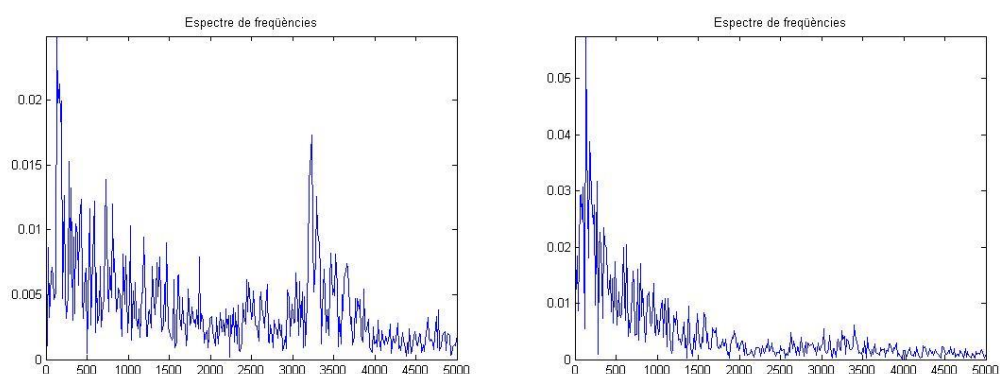


Figura A35 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 2500 (figura de l'esquerra) i 3000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena

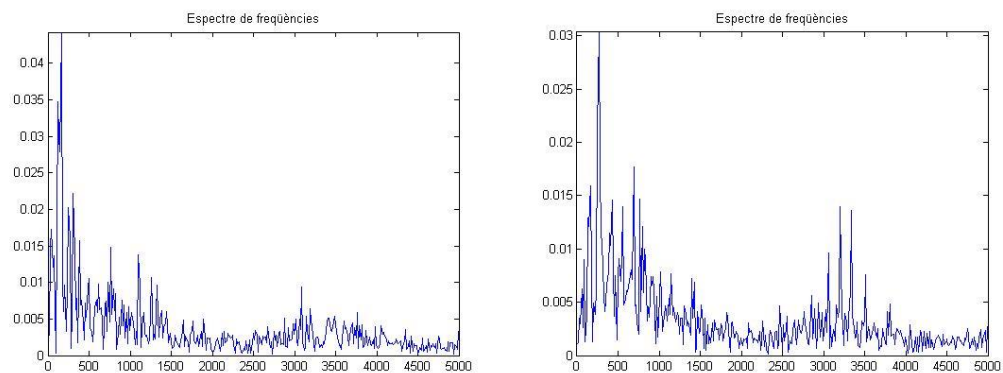


Figura A36 - Espectre obtingut al emetre sons a les freqüències de 3500 (figura de l'esquerra) i 4000 Hz (figura de la dreta) amb la mini-cadena